



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**ČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ OD JEMNÝCH ČÁSTIC**

FINE PARTICLES AND AIR-CLEANING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Martina Bírošíková

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláček

BRNO 2020

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Martina Bírošíková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Ján Poláček**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Čištění ovzduší od jemných částic

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Částice PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> a PM<sub>1</sub>, vznikající mimo jiné při spalování biomasy, způsobují závažná onemocnění respiračního ústrojí člověka.

Účelem této práce bude v přehledné rešerši zpracovat vznik, rozdělení částic, možnosti jejich čištění a jejich vliv na životní prostředí a zdraví člověka.

Práce obsahuje praktické měření tvorby jemných částic na spalovacím zařízení a zároveň navrhuje řešení eliminace těchto částic, případně jejich dodatečné čištění.

### Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršní zpracování problematiky jemných částic a jejich tvorba spalováním biomasy;
2. Měření koncentrace jemných částic na spalovací jednotce;
3. Návrh řešení pro čištění jemných částic v ohledu na lidské zdraví.

### Seznam doporučené literatury:

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 978-0-471-19410-1.

KURFÜRST, Jiří, ed. Kompendium ochrany kvality ovzduší. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-38-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou jemných a ultrajemných častíc, ktoré sú často spájané so znečisťovaním životného prostredia a negatívnymi dopadmi na ľudské zdravie, najmä choroby kardiovaskulárneho charakteru. Cieľom rešeršnej časti tejto práce je popísať vznik a vlastnosti jemných častíc produkovaných spaľovaním biomasy. Experimentálna časť obsahuje popis a vysvetlenie princípu funkcie použitých meracích zariadení, následne porovnáva namerané koncentrácie jemných častíc, ktoré vznikli spaľovaním smrekového a bukového dreva. Nakoniec sú predstavené možnosti eliminácie týchto znečisťujúcich látok.

### **Kľúčové slová**

jemné častice, biomasa, spaľovanie

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with issues with fine and ultrafine particles, also called particulate matter, which is strongly associated with environmental problems and negative effect on human health, especially cardiovascular diseases. The aim of this work is to describe the formation and characteristics of fine particles produced by biomass combustion. The experimental part firstly explains functional principle of used devices and then compares measured concentrations of ultra fine particles produced by combustion of spruce and beech wood. In the end, several possibilities how to eliminate the air pollutants are presented.

### **Key words**

fine particles, biomass, combustion

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

BÍROŠÍKOVÁ, Martina. *Čištění ovzduší od jemných částic* [online]. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124693>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ján Poláček.

## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Čistenie ovzdušia od jemných častíc** vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

24.06.2020

.....  
Dátum

.....  
*Martina Bírošiková*

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto Ing. Jánovi Poláčikovi za cenné rady a pripomienky, ktoré mi poskytol pri vypracovaní záverečnej práce.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	7
2	BIOMASA .....	8
2.1	Vznik biomasy .....	8
2.2	Spôsoby využitia biomasy na energetické účely .....	8
2.3	Fyzikálne vlastnosti biomasy: .....	9
3	SPAĽOVANIE .....	9
3.1	Dokonalé spaľovanie .....	9
3.2	Nedokonalé spaľovanie: .....	10
4	ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY .....	10
4.1	Zdroje znečistenia .....	10
4.2	Tuhé častice v ovzduší .....	11
4.2.1	Tvar tuhých častíc: .....	11
4.2.2	Veľkosť častíc: .....	11
5	JEMNÉ ČASTICE PM .....	13
5.1	Rozdelenie tuhých častíc podľa veľkosti: .....	13
5.2	Vplyv PM na zdravie človeka .....	14
5.3	Výskyt PM .....	16
6	EXPERIMENTÁLNE MERANIE .....	17
6.1	Popis meracej aparatury .....	17
6.1.1	Krbové kachle ABX Grönland .....	17
6.1.2	Riediace zariadenie - Rotating Disc Thermodiluter 379020A .....	18
6.1.3	Ejektorové riediace zariadenie – Dekati Diluter .....	19
6.1.4	TSI Scanning Mobility Particle Sizer .....	20
6.1.5	Triediace zariadenie – Electrostatic Classifier 3080 .....	20
6.1.6	Differential Mobility Analyzer Long 3081 .....	21
6.1.7	Sčítacie zariadenie – Condensation Particle Counter Model 3775 .....	22
6.1.8	Vyhodnocovací softvér – Aerosol Instrument Manager Software .....	22
6.2	Výstup merania .....	23
6.3	Zhodnotenie výsledkov merania .....	27
7	ELIMINÁCIA JEMNÝCH ČASTÍC .....	29
7.1	Rozdelenie vláknitých filtrov .....	30
7.2	Elektrostatické odlučovače .....	31
8	ZÁVER .....	33
	Zoznam použitých zdrojov .....	34



## **1 ÚVOD**

Hoci sa o atmosfére hovorí ako o plynnom obale Zeme, ovzdušie, ktoré dýchame a ktoré nás obklopuje obsahuje okrem dusíka, kyslíka, oxidu uhličitého a ďalších plynov aj tuhé znečisťujúce látky, ktoré vo forme jemných častíc putujú okolitým priestorom. Prirodzeným zdrojom týchto látok je príroda, kde sa počas lesných požiarov, erózie pôdy a výbuchu sopiek do ovzdušia vylučujú tuhé znečisťujúce látky. Avšak prevažná časť nežiadúcich jemných častíc je produkovaná ľudskou činnosťou. Hlavným zdrojom je priemysel, spaľovanie pohonných hmôt v doprave a v neposlednom rade aj vykurovanie domácností. Dôvod, prečo je jemným časticiam venovaná pozornosť, je ich negatívny dopad na životné prostredie a ľudské zdravie. V závislosti od svojej veľkosti sú schopné preniknúť cez dýchacie cesty do tela človeka, pričom dlhodobá expozícia spôsobuje nenávratné poškodenie organizmu.

Prvá časť tejto práce sa zaoberá rešeršným spracovaním problematiky jemných častíc. Opisuje ich vznik počas procesu spaľovania, rozdelenie podľa veľkosti, negatívny dopad na ľudské zdravie a výskyt vo svete.

Druhá časť práce je zameraná na experimentálne meranie koncentrácie jemných častíc, ktoré prebehlo na spaľovacej jednotke, konkrétne v krbových kachliach, v priestoroch laboratórií Energetického ústavu. Použitá meracia aparatúra je popísaná a princíp jej funkcie stručne vysvetlený, následne sú uvedené a zhodnotené výsledky meraní.

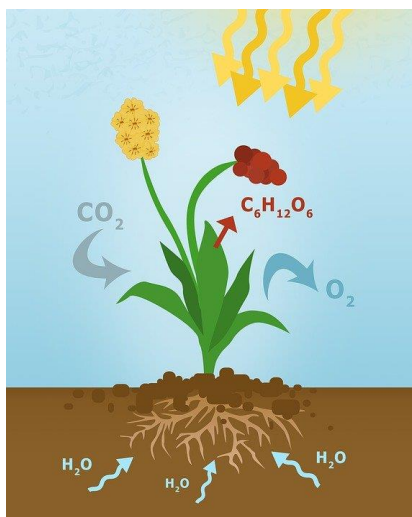
V tretej časti sú stručne popísané možnosti filtrácie jemných a ultrajemných častíc produkovaných spaľovaním biomasy.

## 2 BIOMASA

Vo všeobecnosti biomasou nazývame ľubovoľnú hmotu organického pôvodu. Zdrojom biomasy sú rastliny, živočíchy a biologický odpad, tzv. obnoviteľné zdroje energie, ktoré vznikli v súčasnom geologickom období. Preto do tejto kategórie nezaraďujeme fosílna palivá (ropa, uhlie, zemný plyn). Biomasu môžeme považovať za „konzervu“, v ktorej je uložená energia zo Slnka, pri čom ďalším spracovaním sa pokúšame túto energiu získať a využiť pre svoj prospech. Najstaršou formou využívania biomasy je potrava pre ľudí a zvieratá. Neskôr sme z nej začali vyrábať teplo a elektrickú energiu [1].

### 2.1 Vznik biomasy

Biomasa vzniká chemickým procesom fotosyntézou, počas ktorého dochádza k premene anorganických látok na látky organické. Konkrétne oxid uhličitý a voda sa za pôsobenia slnečnej energie v spolupráci s chlorofylom a enzýmami, mení na cukor, vodu a kyslík [2].



Obr. 2.1 Schéma fotosyntézy [29]

Fotosyntéza je považovaná za najdôležitejšiu chemickú reakciu na svete, bez ktorej by na Zemi neexistoval život. Avšak, potenciál tohto zdroja energie nie je vysoký. Rastliny nie sú schopné využiť a akumulovať všetko svetlo, ktoré na ne počas dňa dopadá. Zároveň pre fotosyntézu využívajú iba úzku oblasť spektra, iba žiarenie v oblasti 400 – 700 nm, ostatné oblasti, napr. infračervené žiarenie, rastliny reflektujú. Pri normálnom slnečnom svetle je účinnosť rastlín približne 13%, podobne ako u fotovoltaiických článkov [1].

### 2.2 Spôsoby využitia biomasy na energetické účely

Rozdelenie podľa spôsobov získavania energie a prípravy biomasy:

- a) termochemická premena biomasy (suché procesy):
  - spaľovanie,
  - splyňovanie,
  - pyrolýza,
- b) biochemická premena biomasy (mokré procesy):
  - alkoholové kvasenie,
  - metánové kvasenie,

- c) fyzikálna a chemická premena biomasy:
  - mechanicky (štiepanie, drvenie, lisovanie, mletie atď.),
  - chemicky (esterifikácia surových bioolejov),
- d) získavanie odpadového tepla pri spracovaní biomasy (kompostovanie, aeróbne čistenie odpadových vôd atď.).

Hoci existuje niekoľko spôsobov získavania energie z biomasy, v praxi sa najbežnejšie používa zo suchých procesov spaľovanie biomasy, z mokrých procesov výroba bioplynu anaeróbnou fermentáciou [2].

### 2.3 Fyzikálne vlastnosti biomasy:

Bežné tuhé palivá hodnotíme podľa chemických a fyzikálnych kritérií, akými sú: výhrevnosť, spalné teplo, merná hmotnosť, údaje z hrubého rozboru (výhrevnosť, hmotnostný obsah vody, popola a prchavého podielu v %), údaje z prvkového rozboru (hmotnostný obsah prvkov C, H<sub>2</sub>, C, N, O<sub>2</sub>, Cl a F v %) a údaje o vlastnostiach popola (teplota spekania, tečenia, topenia a mäknutia). Keďže o biomase uvažujeme taktiež ako o palive, aplikujeme na ňu rovnaké kritériá.

Prvkové zloženie biomasy vo všeobecnosti je nasledovné: približne 50% uhlík, 43% kyslík a 6% vodík v horľavine. V niektorých prípadoch obsahuje aj chlór, fluór, draslík a ťažké kovy, ktoré sú zodpovedné za koróziu niektorých častí kotla a znečisťujú životné prostredie.

Biomasa sa od bežných palív líši jedným zásadným kritériom, obsahom vody, ktorý je častokrát premenlivý. To je hlavným dôvodom, prečo je nevyhnutné biomasu vysušiť, inak počas procesu spaľovania spotrebuje obrovské množstvo tepla, čím sa znižuje výhrevnosť, čo vedie ku nestabilite spaľovania. Dôsledkom nestability spaľovania je napr. zníženie výhrevnosti kotla a skrátenie jeho životnosti.

Ďalším rozdielom medzi biomasou a inými tuhými palivami je nízka a premenlivá hustota, ktorá sa môže líšiť aj v rámci jedného druhu biomasy. Z tohto dôvodu sa u biomasy definuje hmotnosť na špecifikovanú objemovú jednotku, napríklad plný meter, priestorový meter a priestorový meter sypaný [3].

## 3 SPAĽOVANIE

Energetický potenciál biomasy využívame prostredníctvom spaľovania. Látky potrebné pre spaľovací proces sú palivo (napr. drevo), okysličovadlo (vzduch) a splodiny (plynné a pevné spaliny). Palivo obsahuje chemicky viazanú energiu, ktorá sa počas fyzikálno-chemického deja, tzv. horenia, mení na energiu tepelnú.

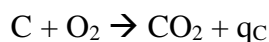
Spaľovanie popisujeme stechiometrickými rovnicami, pomocou ktorých dokážeme vypočítať napr. objem vzduchu potrebného pre spálenie 1 kg paliva, množstvo spalín, ktoré počas reakcie vzniknú a taktiež ich zloženie. Okrem stechiometrických rovníc je možné výpočet uskutočniť aj pomocou výhrevnosti paliva a empirických vzťahov [4].

### 3.1 Dokonalé spaľovanie

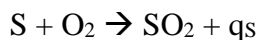
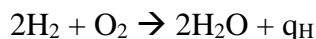
Počas dokonalého spaľovania dochádza k úplnému vyhoreniu vodíka a uhlíka bez strát horľavinou v spalínach alebo tuhých zvyškoch.

Stechiometrické rovnice:

Pri dostatočnom množstve kyslíka zhorí uhlík a vznikne oxid uhličitý, pričom sa vylučuje teplo.



Podobne sa spaľujú aj ostatné prvky horľaviny, ako napr. vodík a siera:



### 3.2 Nedokonalé spaľovanie:

Dokonalé spaľovanie uvažuje ideálny stav, kedy dochádza k úplnej premene energie bez tepelných strát, avšak v skutočnosti a v technickej praxi je možné sa tomuto stavu iba priblížiť. Počas nedokonalého spaľovania časť uhlíku nezhorí vôbec, ďalšia časť zhorí na CO, zvyšok horľaviny zhorí dokonale. Podiel uhlíka, ktorý vôbec nezhorí sa nazýva mechanický nedopal [5].

## 4 ZNEČISŤUJÚCE LÁTKY

### 4.1 Zdroje znečistenia

Zdroje znečistenia ovzdušia sa rozdeľujú na prírodné a antropogénne.

Množstvo látok, ktoré produkujú prírodné zdroje je vysoké, avšak tieto látky sa nepovažujú za vysoko škodlivé. Patrí medzi ne prach zo sopiek, sírovodík, ktorý produkujú baktérie, látky s obsahom dusíka ako napr. čpavok, oxid dusný a oxid dusnatý, ktoré sú taktiež vytvárané baktériami. Ďalšími producentmi týchto látok sú živočíchy, more, lesné požiare a iné.

Skutočným problémom znečistenia ovzdušia sú toxické látky vytvorené ľudskou činnosťou, ktoré tvoria približne 10% hmotnosti látok vylučujúcich sa do zemskej atmosféry. Množstvo, koncentrácia a druh nežiaducich látok, ktoré pochádzajú z týchto antropogénnych zdrojov, je v každej krajine iná. Ovpływujúce faktory sú najmä spôsob výroby energie.

Pri posudzovaní miery znečistenia rozlišujeme dva pojmy – emisie a imisie. Emisie udávajú tok znečisťujúcej látky do ovzdušia, udáva sa napr. v kg/s. Imisie vyjadrujú koncentráciu znečisťujúcich látok v prízemných vrstvách atmosféry, udáva sa napr. v  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [6].

Spaľovanie biomasy, rovnako ako spaľovanie iných organických palív, je zdrojom látok, ktoré znečisťujú životné a pracovné prostredie.

Počas procesu spaľovania v prvom rade vzniká  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  v podobe vodnej pary. Oxid uhličitý sa častokrát považuje za neutrálny zdroj znečistenia, pretože teoreticky rastliny spotrebúvajú určité množstvo  $\text{CO}_2$  a ukladajú ho vo forme biomasy, následne sa toto isté množstvo  $\text{CO}_2$  počas spaľovania opäť vylúči do atmosféry. Avšak, tento predpoklad by bol úplne pravdivý v prípade, že by sme ťažili drevo iba sekerami a ručnými pílmami. V praxi sa pri ťažbe využíva ťažká technika, stroje poháňané elektrinou či naftou, čiže ďalšie zdroje  $\text{CO}_2$ , ktorý sa podieľa na vzniku skleníkového efektu. Zároveň sa pri pestovaní biomasy aplikujú do pôdy rôzne hnojivá a pesticídy.

Ďalšími znečisťujúcimi látkami, ktoré vznikajú spaľovaním je napr. CO, ktorý sa tvorí nedokonalým spaľovaním. Množstvo vylúčeného oxidu uhoľnatého závisí na teplote spaľovania a množstve okysličovadla. Ak je teplota dostatočne vysoká a prívod vzduchu veľký, množstvo vyprodukovaného CO je minimálne, pretože oxiduje na  $\text{CO}_2$ . Dlhodobý styk ľudského organizmu s CO môže spôsobiť poškodenie dýchacieho a obehového systému, a to dokonca aj pri nízkych koncentráciách oxidu uhoľnatého.

Okrem iného dochádza k tvorbe oxidov dusíka  $\text{NO}_x$ .  $\text{NO}_x$  sa asi z 95% skladá z NO a zvyšných 5% tvorí  $\text{NO}_2$ . Pri vysokej teplote spaľovania vznikajú termické oxidy dusíka,

avšak spaľovanie biomasy prebieha zväčša pri teplote 700°C až 900°C, kedy dochádza k vzniku palivových dusičnanov.

Obsah síry v biomase je minimálny, čiže produkcia SO<sub>2</sub> je nízka [1] [2] [4].

## 4.2 Tuhé častice v ovzduší

Tuhé častice sú definované na základe ich fyzikálnych a chemických vlastností, a rozmerových parametrov, pri čom v technickej praxi sa často tuhé častice rozptýlené v prostredí označujú ako prach, ktorý vznikol mletím, drvením, oterom atď. Bližšia špecifikácia je uvedená v tab. 4.1 nižšie [6].

Tab. 4.1 Popis tuhých častíc [6]

Názov	Veľkosť [μm]	Vznik	Presnejšia charakteristika
Hrubý dym	0,10 - 1,00	oxidační procesy, kondenzáciou látok vyparovaných za tepla	napr. dym pri zváraní, tavenie kovov
Jemný dym	0,01 - 0,50	nedokonalé spaľovanie	obsahujú zväčša uhlík
Popolček	1,00 - 100	úlet zo spaľovacích zariadení	produkt spaľovania uhlia
Aerosól	0,01 - 1,00	chemické reakcie vodnej pary a plynov	zmes jemných tuhých častíc a plynu

### 4.2.1 Tvar tuhých častíc:

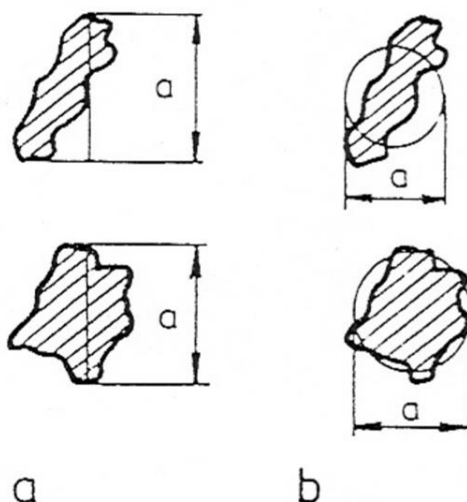
Tvar tuhých častíc v ovzduší je väčšinou nepravidelný a veľkosť taktiež variuje. Tieto parametre značne ovplyvňujú mieru usadzovania častíc v gravitačnom, odstredivom alebo elektrostatickom poli. Podľa tvaru rozlišujeme 3 základné druhy prachových častíc na nasledovné:

- **Izometrické** – vo všetkých smeroch majú približne rovnaký rozmer, ich veľkosť sa častokrát aproximuje guľou alebo kockou.
- **Laminárne (ploché)** – dva z troch rozmerov sú výrazne väčšie. Ich tvar môžeme prirovnať ku doštičke.
- **Fibrilárne (vláknité)** – jeden rozmer je značne väčší než ostatné. Tieto častice majú tvar vlákien, ihlíc [7].

Tvar častíc závisí najmä na spôsobe ich vzniku. Ideálny tvar častice je guľa. Tento tvar vzniká kondenzáciou a tuhnutím pár látok. Ak vznikajú pri mechanických operáciách, majú omnoho zložitejší tvar. Častice, ktoré vznikajú v procese spaľovania, majú v sebe dutiny rôznych veľkostí [6].

### 4.2.2 Veľkosť častíc:

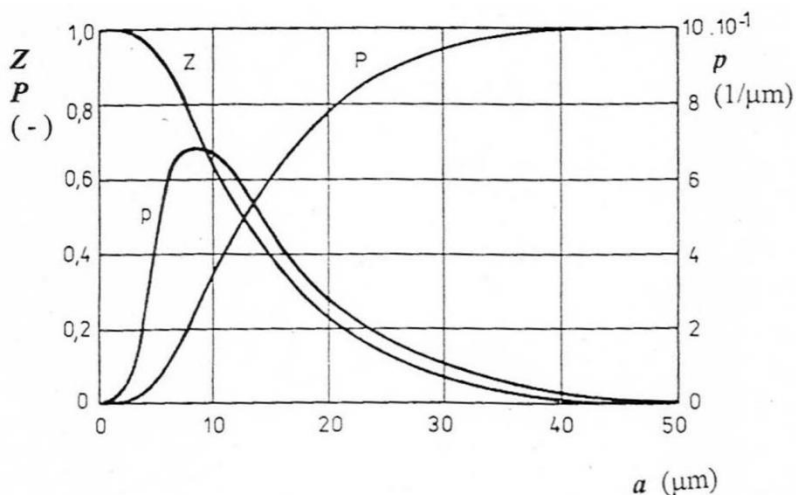
Veľkosť častíc definujeme podľa ich rozmeru – priemer častice  $a$ , uvádza sa v μm. Feretov priemer je určený ako najväčší rozmer častice v danom smere. Ďalej je možné určiť veľkosť častice aj podľa priemeru (gratikulárneho) kruhu, ktorého plocha je čo najbližšia ploche priemetu častice, vid' obr. 4.1. Tieto rozmery sa určujú pomocou mikroskopu [6].



Obr. 4.1 Rozměry částic  
a – Feretov priemer, b – gratikulárny kruh [6]

Vzhľadom na to, že veľkosť jednotlivých častíc sa v značnej miere líši, podiel množstva častíc danej veľkosti sa vyjadruje pomocou kriviek zrnitosti nasledovne:

„Krivka početnosti  $p$  udáva pomerný počet alebo hmotnosť častíc určitej veľkosti vo vzorku. Kumulatívna početnosť sa vyjadruje krivkou zvyškov alebo prepádov. Krivka zvyškov  $Z$  udáva pomerný počet alebo hmotnosť častíc väčších, než je príslušná veľkosť častice  $a$ . Krivka prepádov  $P$  udáva pomerný počet alebo hmotnosť častíc menších, než je príslušná veľkosť častice  $a$ .“ [6] (preložené z českého jazyka)



Obr. 4.2 [6]

Merný povrch častíc rovnako ako ich tvar sú kľúčovými parametrami, ktoré ovplyvňujú ich negatívny dopad na ľudské zdravie. Toxicita častice je priamoúmerná pomeru strán častice. Obdobná paralela platí pri reaktivnosti, tú ovplyvňuje najmä plocha povrchu častice. Zároveň je potrebné rozlíšiť chemické vlastnosti a chemické zloženie danej častice. Variácia týchto vlastností má pôvod v kryštálickej štruktúre daného materiálu. Zjednodušene, dve častice, ktoré majú rovnaké chemické zloženie, ale rôznu kryštálickú štruktúru, sa líšia svojimi chemickými vlastnosťami a toxicitou [8].

## 5 JEMNÉ ČÁSTICE PM

Jemné částice, častokrát označované ako PM, z anglického pomenovania particulate matter, sú pevné částice, ktoré poletujú v ovzduší, pri čom sa navzájom líšia v závislosti na svojom tvare, zložení a pôvode.

Ku prirodzeným zdrojom jemných častíc patrí sopečná činnosť, požiare, erózia pôdy atď. Avšak, koncentrácia PM v ovzduší zaznamenala nárast najmä v dôsledku ľudskej činnosti, prevažne sa jedná o spaľovanie biomasy so zámerom vykurovania, spaľovanie odpadu v spaľovniach či benzínu a nafty v automobilovej, lodnej aj leteckej doprave.

Dlhodobý nárast množstva častíc v ovzduší vedie ku zníženiu kvality životného prostredia a taktiež zvyšuje chorobnosť a úmrtnosť živých organizmov, vrátane človeka [9].

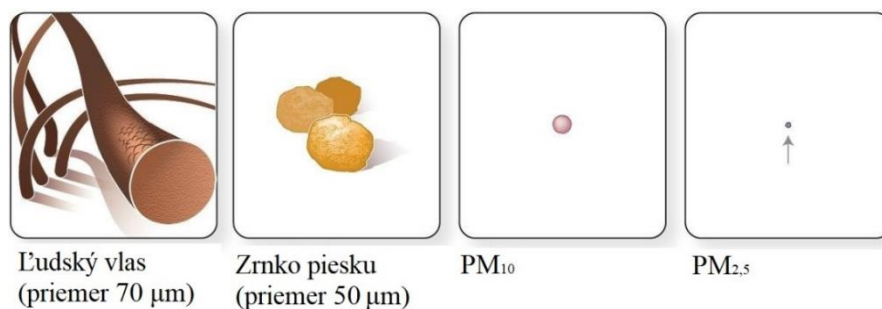
### 5.1 Rozdelenie tuhých častíc podľa veľkosti:

Častice, ktoré sú v intervale veľkosti od 2,5  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$  vznikajú prevažne mechanicky, napr. drvením a oterom. Vyskytujú sa v podobe popolčeka a prachu, ktorý sa skladá z nitridov, chloridov, oxidov kremíka, hliníka atď.. Tieto častice nie sú rozpustné vo vode. Prirodzeným spôsobom ich z ovzdušia odstraňuje dážď. Kvapky dažďa na seba naviažu častice, ktoré sa po dopadnutí na zemský povrch usadia. V prípade, že sa šíria vzduchom, vietor ich premiestňuje až stovky kilometrov. Vzdialenosť, ktorú častice precestujú závisí na ich veľkosti a chemickom zložení. Čím väčšie sú častice, tým menšiu vzdialenosť dokážu prekonať.

Na druhej strane, častice menšie než 2,5  $\mu\text{m}$  vznikajú spaľovaním uhlia, dreva, nafty a benzínu. Následne kondenzujú, zrážajú sa, vyparujú sa vo forme hmly a iných kvapôčiek kvapalín, v ktorých sa rozpustil a reagoval plyn. Skladajú sa zo síranov, uhlíka, ťažkých kovov a organických zlúčenín, ktoré na seba viažu vodu. V tejto podobe sa šíria atmosférou Zeme na obrovské vzdialenosti, stovky až tisíce kilometrov. Porovnanie veľkosti častíc je názorné na obr. 5.1 [10].

Tab. 5.1

Názov	Priemer [ $\mu\text{m}$ ]
PM <sub>10</sub>	< 10
PM <sub>4,0</sub>	< 4,0
PM <sub>2,5</sub>	< 2,5
PM <sub>1,0</sub>	< 1,0
PM <sub>0,5</sub>	< 0,5



Obr. 5.1 Porovnanie veľkosti častíc [28]

## 5.2 Vplyv PM na zdravie človeka

Na základe epidemiologických štúdií, ktoré sa realizujú po celom svete, bola nájdená korelácia medzi zvýšenou koncentráciou PM v ovzduší a výskytom ochorení a úmrtí v dôsledku respiračných chorôb, ako napr. astma, chronická obštrukčná choroba pľúc, rakovina, srdcové choroby a poškodenie iných orgánov. Najzraniteľnejšia skupina, ktorá sa stáva obeťou týchto ochorení, sú ľudia žijúci v blízkosti priemyselných oblastí.

Zdravotné riziká, ktoré môžu PM častice spôsobiť, závisia od toho, ako hlboko preniknú do ľudského organizmu. Isté množstvo častíc sa dostáva do ľudského tela spolu s potravou a cez kožu, avšak prevažná väčšina týchto zdraviu škodlivých látok vniká do tela cez dýchacie cesty. Veľkosť častíc je počas transportu organizmom rozhodujúca. PM<sub>2,5-10</sub> sa ukladajú v horných dýchacích cestách a sme schopní ich z tela odstrániť vykašliavaním. Menšie častice putujú hlbšie do pľúc až k alveolám, viď obr. 5.2. Alveola, pľúcny mechúrik, je orgán guľovitého tvaru, prostredníctvom ktorého dochádza ku výmene plynov medzi organizmom a prostredím. Touto cestou sa nežiaduce toxické, zápalové a karcinogénne látky dostávajú cez pľúca do krvného obehu, a tak do celého tela človeka. Často sa ukladajú v orgánoch, ktoré sú najviac zásobované krvou, čiže srdce a pečeň.

Vnútny povrch pľúc má veľkosť v rozmedzí 75 – 140 m<sup>2</sup>, čo zahŕňa aj približne 300 miliónov alveol. Z týchto údajov vyplýva, že práve pľúca sú hlavnou vstupnou bránou vdýchnutých PM častíc do ľudského tela. Kovy, ktoré sú zložkami PM častíc, vytvárajú reaktívne druhy kyslíka, v dôsledku čoho sa bunky v organizme začnú brániť, a teda vyvolávajú protizápalovú reakciu, čo vedie napr. ku vzniku a zhoršeniu astmy [8] [11].



Obr. 5.2 Schéma ukladania častíc v ľudskom tele [32]

Štúdie WHO (World Health Organisation - Svetovej zdravotníckej organizácie), ktoré od roku 2005 prebiehajú nielen v Európe, ale po celom svete, zverejnili výsledky, ktoré jasne poukazujú na negatívny dopad PM<sub>2,5</sub> na ľudské zdravie. Výskum v Holandsku z roku 2012 potvrdil zníženie funkcie pľúc u 4 ročných detí. Ďalšie asociácie medzi jemnými časticami a ich dopadom na ľudské zdravie sa týkajú zníženia miery pôrodnosti, predčasných pôrodov a podpriemernej hmotnosti narodených detí [12].

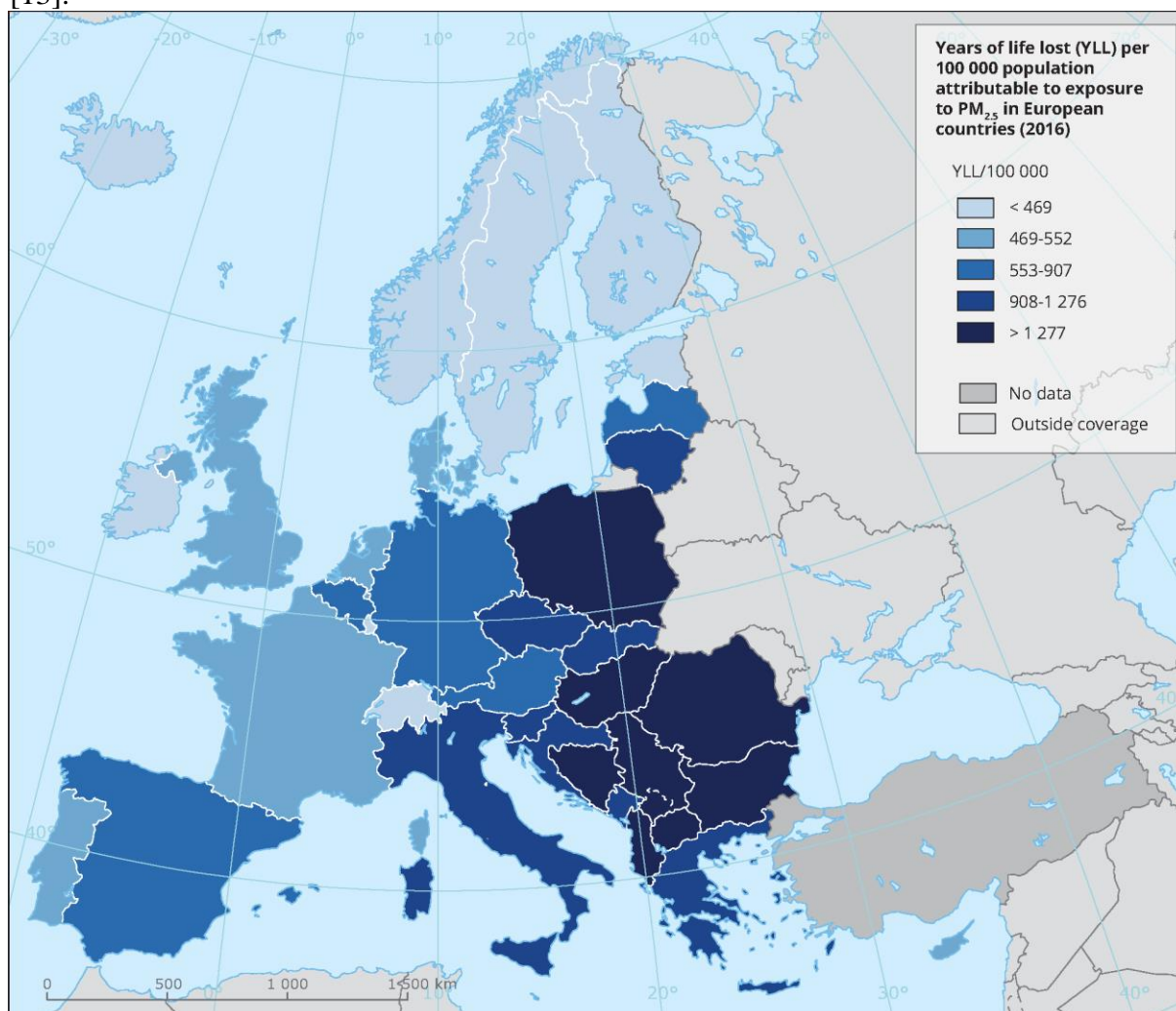
Ochoreniam v dôsledku vystavenia PM častíc podliehajú najmä starší ľudia, osoby s cukrovkou a kardiorespiračnými ochoreniami. Na rozdiel od zdravých jedincov, ľudia postihnutí chorobami ako napr. astma alebo chronická bronchitída, vo vyššej miere reagujú na znečisťujúce látky. Ďalšou rizikovou skupinou sú ľudia žijúci v tesnej blízkosti hlavných ciest,



priemyselných zón atď. Podľa odhadov až 10% obyvateľov Amsterdamu žije pri cestách, po ktorých denne prejde približne 10 000 áut [10].

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim vplyv PM častíc na zdravie človeka je expozičná doba, čiže čas, ktorý organizmus strávi v prostredí s vyšším výskytom častíc. Toxikologické a klinické štúdie z roku 2006 dokazujú, že dokonca aj krátkodobá expozícia časticiam vznikajúcich pri spaľovaní (niekoľko hodín) vedie ku okamžitým zmenám v organizme. Expozícia na dennej báze (24 hodín) a ročnej báze koreluje s úmrtnosťou a chorobnosťou, z čoho vyplýva, že dôsledky dlhodobého vystavenia škodlivým časticiam sú oveľa drastickejšie [12].

Vplyv znečistenia ovzdušia na ľudské zdravie sa taktiež vyjadruje v jednotkách YLL z anglického výrazu Years of life lost, čo v preklade znamená stratené roky života. Ak človek zomrie predčasne, tento jav sa označuje ako stratené roky života. Nižšie uvedená mapa, vid' obr. 5.3, znázorňuje prepočet stratených rokov života z roku 2016 na 100 000 obyvateľov kvôli  $PM_{2.5}$ . Odhady z roku 2019 uvádzajú, že v Európe každoročne predčasne umrie 400 000 ľudí v dôsledku dlhodobej expozície  $PM_{2.5}$ . Hoci toto číslo sa javí ako privysoké, v porovnaní so štatistikami z roku 1990 sa počet obetí predčasných úmrtí v dôsledku  $PM_{2.5}$  znížil o 60% [13].



Obr. 5.3 Mapa znázorňujúca stratené roky života (YLL) v prepočte na 100 000 obyvateľov [13]

### 5.3 Výskyt PM

Jemné částice vyprodukované na jednom mieste ovplyvňujú kvalitu ovzdušia nielen v celej krajine, ale aj v susedných štátoch a na celom kontinente. Z celkového množstva PM častíc, ktoré sú vyprodukované jednou krajinou sa preniesie do susedného štátu zväčša 3% až 15%. Ako uvádza štúdia WHO z roku 2010, súčet týchto dielčích príspevkov od susedných krajín môže, ako v prípade Nórska, ovplyvniť koncentráciu PM častíc až o 30%. Množstvo prenesených častíc, samozrejme, závisí aj na meteorologických podmienkach, a teda sú tieto merania uskutočňované v časových rozstupoch počas celého roka [10].

Koncentrácia a distribúcia častíc závisí od konkrétnej priemyselnej činnosti v danej oblasti, ďalej od materiálu, ktorý sa spracováva a aj od typu filtrov, ktoré sa používajú na čistenie ovzdušia. Štúdie WHO z roku 2009 poukazujú na fakt, že množstvo a druh častíc, ktoré sa vyskytujú napr. vo výrobných halách závisí aj od konkrétnej technologickej činnosti na pracovisku, t.j. zváranie, odlievanie, betónovanie, brúsenie atď.. Koncentrácia PM častíc, ktoré vznikajú pri vyšších teplotách (nad 1000 °C) je väčšia než výskyt častíc, ktoré vznikajú počas chladnejších procesov. Z toho vyplýva, že pri výrobe odlievaním alebo počas zvárania vzniká vyššia koncentrácia PM častíc než pri betónovaní či drvení. Navyše, množstvo častíc je podmienené aj množstvom kyseliny sírovej v oblakoch, pretože výskyt SO<sub>2</sub> napomáha tvorbe a zhlukovaniu PM častíc [11].

Ďalším fenoménom sú tzv. priemyselné oblaky. Koncentrácia častíc je maximálna v okolí zdroja (napr. komín), a postupne sa so vzdialenosťou znižuje. Častice väčšie než 2,5 μm sa usadzujú rýchlejšie, zatiaľ čo menšie častice sa prenášajú na väčšie vzdialenosti. Transport ovzduším ovplyvňuje aj atmosférická dynamika – rýchlosť a smer vetra, turbulencie a vertikálny teplotný profil. V prípade miest, ktoré sa nachádzajú na pobrežiach je nevyhnutné brať do úvahy aj morské a pevninové brízy [11].

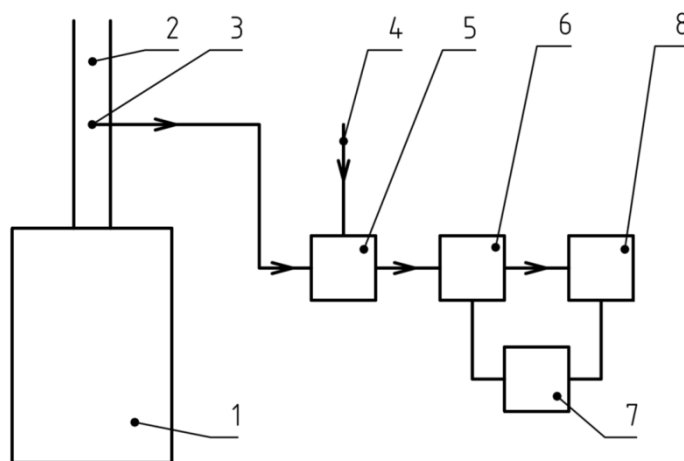
K určení zdroja znečistenia je možné využiť analýzu dreva. Kleeman a kol. skúmajú zloženie borovice, dubu a eukalyptového dreva, pričom zisťujú zastúpenie síranov, dusičnanov, chloridov, amoniaku, draslíka a brómu. Touto analýzou sa snažia doceliť metódu, ktorou by bolo možné po detekcii jemnej častice v ovzduší vystopovať jej presný pôvod, a teda určiť zdroj znečistenia. V štúdii je uvedené, že zvýšená koncentrácia solí, čiže sodík a chlorid, môžu viesť k záveru, že zachytená častica vznikla spaľovaním dreva, ktoré pochádza z pobrežia oceánu [14].

## 6 EXPERIMENTÁLNE MERANIE

Počas procesu spaľovania biomasy sa vždy produkujú aj nežiaduce polutanty, ktoré boli spomínané v predchádzajúcich kapitolách. Nasledujúca časť opisuje experimentálne meranie jemných častíc, ktoré boli vyprodukované spálením dreva v krbových kachliach v priestoroch laboratórií Fakulty strojného inžinierstva v Brne.

### 6.1 Popis meracej aparatury

Merací okruh pozostáva zo zariadení, ktoré na seba nadväzujú. Zdrojom tuhých znečisťujúcich látok sú krbové kachle, v ktorých dochádza ku spaľovaniu dreva. Podľa normy ČSN EN 13240 a ČSN EN 13229 je presne 1m od ústia spalín umiestnená v spalínovode sonda, ktorá odoberá vzorky, ktoré sú presúvané vyhrievanou hadičkou s priemerom 6 mm do riediaceho zariadenia. Zriedené spaliny putujú do triediaceho zariadenia, kde sa separujú častice podľa veľkosti na požadované rozmedzie 17,5 až 520 nm. Poslednou časťou okruhu je sčítavacie zariadenie. Ku týmto zariadeniam je pripojený notebook, kde software spracováva namerané dáta. Detailný popis týchto zariadení je uvedený nižšie.



Obr. 6.1 Schéma meracej aparatury,

1 – krbové kachle, 2 – spalínovod, 3 – odberová sonda, 4 – prívod suchého čistého vzduchu, 5 – riediace zariadenie, 6 – triediace zariadenie, 7 – notebook, 8 – sčítacie zariadenie.

#### 6.1.1 Krbové kachle ABX Grönland

Zdrojom znečisťujúcich látok počas experimentálneho merania boli krbové kachle od spoločnosti ABX, ktoré sú určené k vykurovaniu obytných priestorov. V katalógu výrobcu je ako najvhodnejšie palivo uvedené drevo a ekobrikety. Počas tohto experimentu bolo v pravidelných časových intervaloch pridávané suché drevo s hmotnosťou približne 2kg. Mokré drevo by mohlo znížiť účinnosť kachlí až o 20%.

Kachle tohto typu sú určené na vykurovanie s občasným dohľadom, a teda regulácia samotného procesu spaľovania je závislá na používateľovi. Počas experimentu bol pravidelne regulovaný primárny a sekundárny zdroj vzduchu. Vzduch je privádzaný do spaľovacieho priestoru kachlí pod rošt priamo z miestnosti, kde sa nachádzajú kachle. Správnou reguláciou prívodu vzduchu sa zvyšuje účinnosť vykurovania a dochádza ku zníženiu produkcie tuhých znečisťujúcich látok. Použitý typ kachlí má zabudovaný aj terciárny prívod vzduchu, ktorý zabezpečuje dohorievanie (dodatočné spaľovanie nespálených plynov), avšak terciárny prívod nie je možné regulovať. Je náročné generalizovať optimálne nastavenie prívodu vzduchu, pretože proces spaľovania je ovplyvnený mnohými faktormi, napr. druh paliva a jeho vlhkosť,

vonkajší atmosférický tlak a ťah komína. ABX krbové kachle Grönland 4673-6 majú optimálny ťah pri nastavenom podtlaku na 12 Pa. S využitím klapky v komíne bolo regulované prúdenie plynu a požadovaná hodnota tlaku bola kontrolovaná pomocou kvapalinového a digitálneho tlakomeru [15].

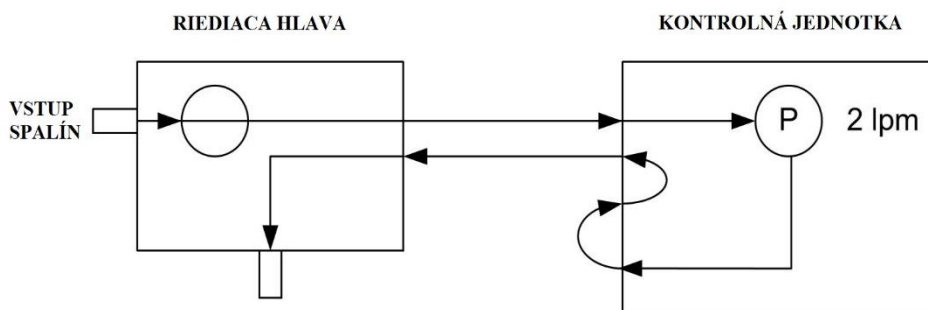


Obr. 6.2 Krbové kachle ABX Grönland [33]

### 6.1.2 Riediace zariadenie - Rotating Disc Thermodiluter 379020A

Pred vstupom spalín do triediaceho a sčítavacieho zariadenia je potrebné ich zriediť. Z odberového miesta putujú vzorky hadičkou do tepelnej riedičky s rotujúcim diskom od firmy TSI s názvom Rotating Disc Thermodiluter 379020A. Tento prístroj sa využíva napr. na riedenie a úpravu výfukových plynov zo vznetrových a zážihových motorov, ďalej na vykonávanie emisných kontrol komínov pri spaľovaní dreva a uhlia a pri štúdiách plynov a aerosólov vznikajúcich inými procesmi.

Toto zariadenie sa skladá z dvoch hlavných častí, jednou z nich je systém obsahujúci riediacu jednotku, pneumatické a elektrické prepájacie časti, druhou časťou je riediaca hlava, vid' obr. 6.3. Práve do riediacej hlavy vstupujú privádzané spaliny.



Obr. 6.3 Schéma riediaceho zariadenia s rotačným diskom [16]

Vnútri riediacej hlavy sa nachádza rotujúci disk s niekoľkými dutinami, ktorý spolu s privádzaným vzduchom riedi skúmané vzorky. Pomer riedenia je možné nastaviť v intervale od 15:1 do 3000:1. Riediaci pomer je závislý od rýchlosti otáčania kotúča, ktorá závisí od prietoku. Prietok je možné ovládať prostredníctvom riediacej jednotky. Ideálna hodnota prietoku odporučená výrobcom je 1l/min [16].



Obr. 6.4 Princíp funkcie riediaceho zariadenia [34]

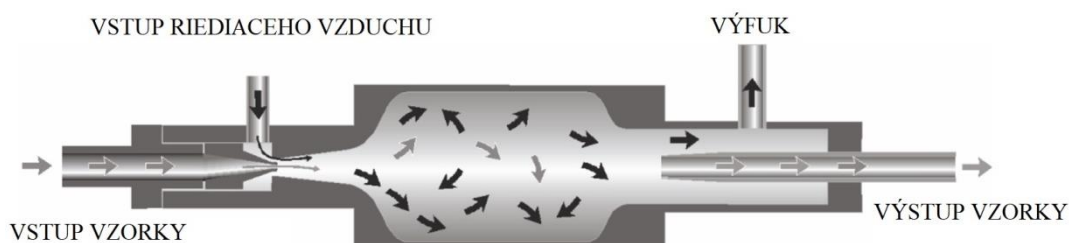
Vzhľadom na to, že rotujúci disk s dutinami vyžaduje údržbu a čistenie, v dobe merania nebolo toto meracie zariadenie k dispozícii. Preto bola využitá ejektorová riedička, ktorá je popísaná v nasledujúcom texte.

### 6.1.3 Ejektorové riediace zariadenie – Dekati Diluter

Riediace zariadenie od firmy Dekati bolo navrhnuté pre použitie s prístrojom na meranie častíc ELPI (Electrical Low Pressure Impactor), avšak je možné ho pripojiť aj ku iným zariadeniam, ktoré analyzujú jemné častice obsiahnuté v plynách.

Proces riedenia je založený na ejektorovom princípe. Čistý, suchý a vyhrievaný vzduch je privádzaný do riedičky cez trysku, ktorá reguluje prietok riediaceho vzduchu. Privádzaný vzduch spôsobuje pokles tlaku v ejektorovej dýze, čím zabezpečuje tok skúmaných vzoriek častíc smerom do riediacej komory. Zmiešaním vzduchu s privádzanými spalinami dochádza ku riedeniu skúmaných vzoriek. Tento proces je znázornený na obr. 6.5 nižšie. Pomer riedenia si zachováva konštantnú hodnotu v prípade, že je splnená podmienka rovnosti tlakov na vstupe a výstupe riedičky. V tomto prípade bol udržiavaný pomer riedenia 1:8,44 [17].

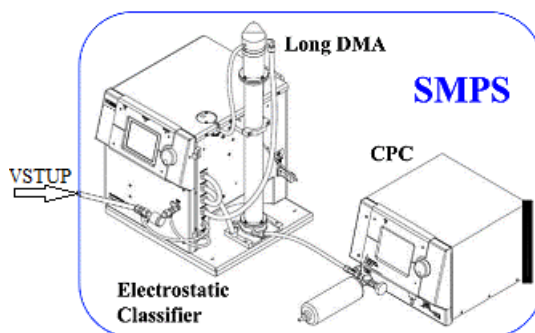
Cieľom merania je skúmať častice, ktoré sa nachádzajú 1m od ústia spalinovodu. Problémom je nežiaduca kondenzácia plynu, ku ktorej prirodzene dochádza prúdením vzoriek v meracom okruhu. Z tohto dôvodu je vedúca hadička, riedička a riediaci vzduch vyhrievané na približne 250°C.



Obr. 6.5 Schéma ejektorového riediaceho zariadenia [17]

#### 6.1.4 TSI Scanning Mobility Particle Sizer

K určení veľkosti a koncentrácie skúmaných častíc bol použitý systém merania metódou skenovania častíc SMPS, ktorú vyvinula firma TSI. Táto metóda využíva prístroje znázornené na obr. 6.6, ktoré sú popísané v nasledujúcej časti.



Obr. 6.6 Schéma SMPS [30]

#### 6.1.5 Triediace zariadenie – Electrostatic Classifier 3080

Vzorky vstupujúce do triediaceho zariadenia majú širokú škálu veľkosti častíc, tzv. polydisperzný aerosól, pričom cieľom je dosiahnuť monodisperzný aerosól na výstupe zo zariadenia.

Elektrostatický klasifikátor sa skladá z nasledujúcich častí:

- neutralizačná komora, ktorá zabezpečuje zneutralizovanie elektrického náboja častíc aerosólu vstupujúceho do DMA,
- DMA Long 3081– Differential Mobility Analyzer,
- riadiaca jednotka prepojená s počítačom [18].

Pomocou otočného gombíka je možné na prístroji nastavovať parametre, ktoré sa zobrazujú na kontrolnom displeji, viď obr. 6.7.

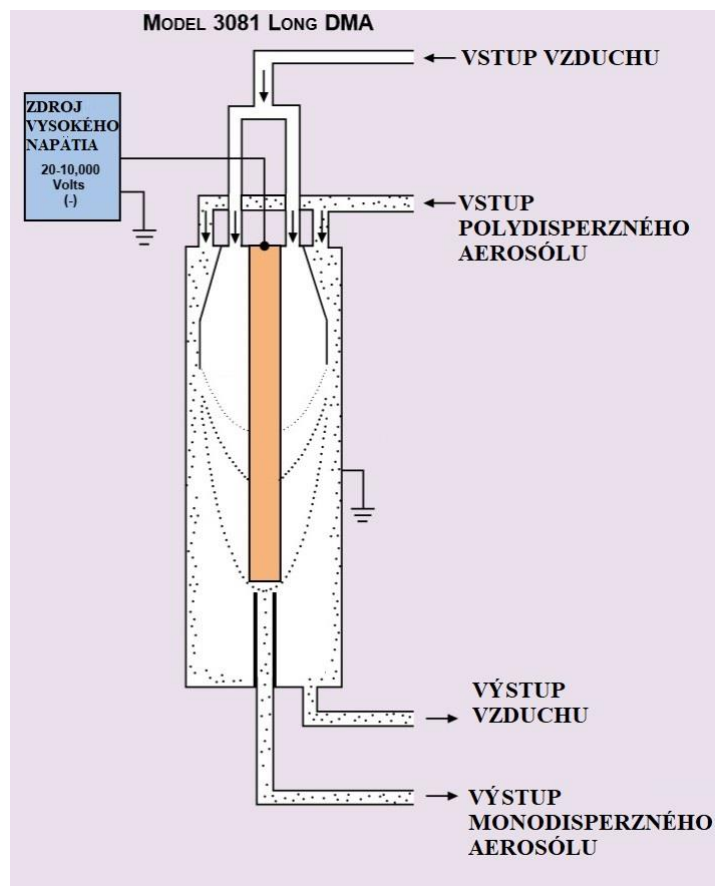
DMA-Voltage	Particle Diameter
2463.0 V	100.0 nm
Sheath Flow	Sample Flow
15.0 lpm	1.5 lpm
Panel Ctrl	Menu
	DMA 3081

Obr. 6.7 Výstupný kontrolný monitor riadiacej jednotky zariadenia Electrostatic Classifier 3080, DMA – Voltage – Napätie, Particle Diameter - Priemer častíc, Sheath Flow – Prietok vzduchu, Sample Flow – Prietok vzoriek [18]



### 6.1.6 Differential Mobility Analyzer Long 3081

Rozsah velikosti částic, které procházejí zařízením DMA se pohybuje v intervalu 10 až 1000 nm. Analyzátor je složený z dvou sústředných valcových elektrod, které sú od seba navzájom elektricky izolované. Privádzaný čistý vzduch prúdi axiálne smerom dole, pri čom sa mieša s polydisperzným rovnomerne rozloženým tokom vzoriek. Záporne nabitá elektróda umiestnená v strede odpudzuje záporne nabitú častice, ktoré prilnú na stenu. Kladne nabitú častice sú unášané prúdom vzduchu a následne silou vytvorenou elektrickým poľom priťahované ku záporne nabitej elektróde. Elektrické pole spôsobuje pohyb nabitých častíc v radiálnom smere, a teda štrbinou vedúcou z DMA sú schopné ďalej prejsť iba častice s vyhovujúcou trajektóriou pohybu závislou na ich elektrickom náboji, čím je dosiahnutý požadovaný monodisperzný výstup. Princíp funkcie je zobrazený na obr. 6.8 Po výstupe z elektrostatického klasifikátora je možné určit koncentráciu častíc danej veľkosti v sčítacom zariadení CPC. Veľkosť distribuovaných častíc je možné ovládať nastavením napätia na zdroji [18].



Obr. 6.8 Schéma Differential Mobility Analyzer Long 3081 [31]

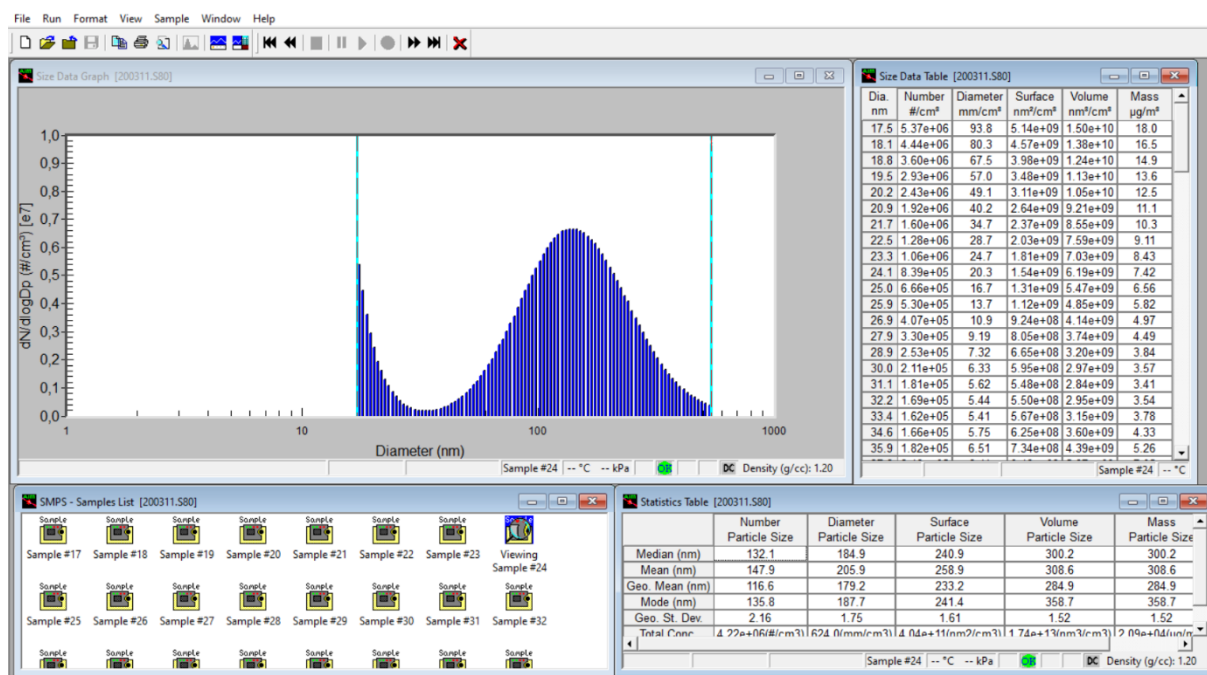
### 6.1.7 Sčítacie zariadenie – Condensation Particle Counter Model 3775

Prístroj CPC poskytuje meranie koncentrácie častíc v rozmedzí od 0 do 107 častíc na  $\text{cm}^3$ . Veľkosť častíc, ktoré sú privádzané do sčítacieho zariadenia CPC, sa pohybuje rádovo v nanometroch, avšak skenovacia metóda využívaná v tomto zariadení je schopná detekovať častice vo veľkostnom spektre mikrometrov. Z tohto dôvodu sa vstupujúce vzorky miešajú s presýtenou alkoholovou parou, konkrétne s butanolom. Keďže samotné častice slúžia ako kondenzačné jadrá, dochádza ku obaleniu častice vrstvou kvapaliny, a tak je optický detektor schopný spočítať kvapôčky. Pri metóde merania SMPS bol nastavený prietok 0,3l/min, ktorý je regulovaný prostredníctvom trysky [19].

### 6.1.8 Vyhodnocovací softvér – Aerosol Instrument Manager Software

Využitím programu Aerosol Instrument Manager Software od firmy TSI je možné zaznamenať a spracovať dáta z merania. Softvér je potrebné nainštalovať napr. na notebook, ktorý je prepojený s triediacim a sčítacím zariadením. Užívateľsky priaznivé prostredie, vid' obr. 6.9, sa skladá z niekoľkých častí. Graf zobrazuje závislosť počtu častíc na centimeter kubický od priemeru častíc. V tabuľke dát sú zoradené častice podľa priemeru, ďalej softvér poskytuje informácie o počte, povrchu, objeme a hmotnosti častíc v prepočte na centimeter kubický. Celé meranie prebieha v dlhšom časovom intervale, pričom program triedi namerané údaje do jednotlivých vzoriek, jedna vzorka je meraná 60 sekúnd.

Dáta namerané programom Aerosol Instrument Manager Software je možné exportovať do iných formátov a ďalej spracovávať v ľubovoľných programoch.



Obr. 6.9 Pracovné prostredie programu Aerosol Instrument Manager Software

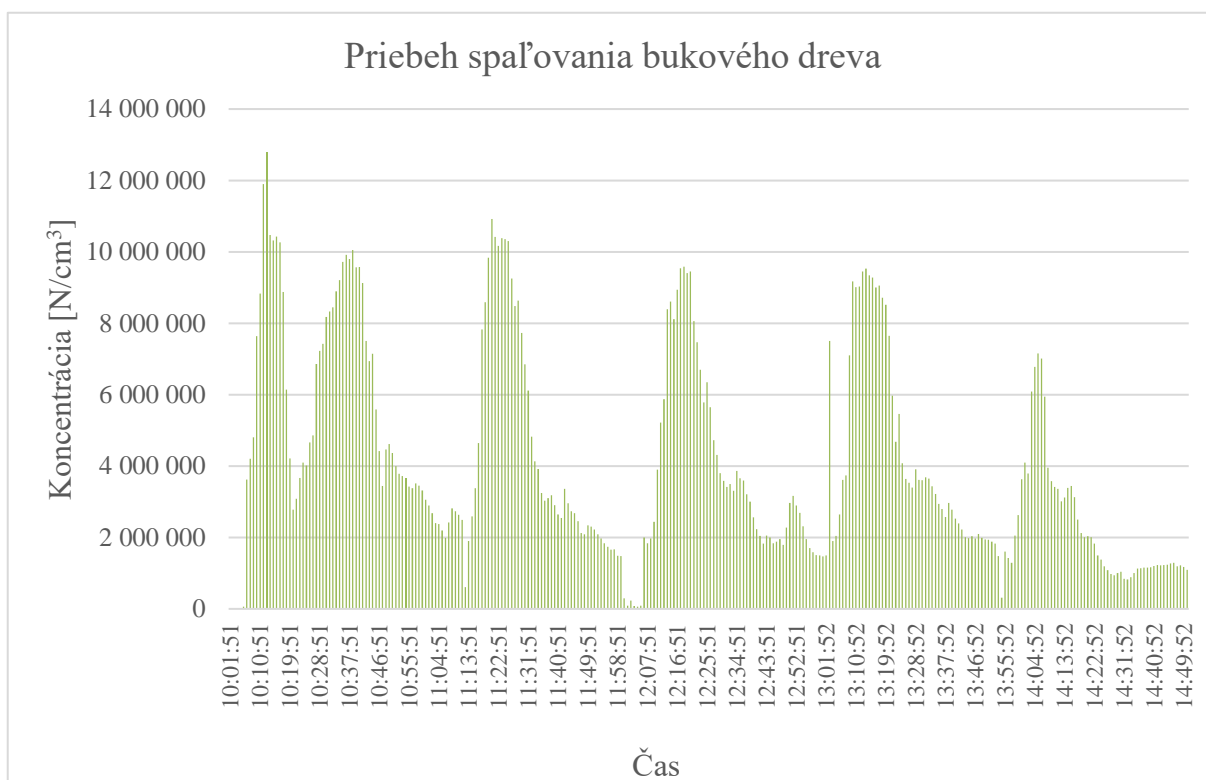


## 6.2 Výstup merania

Cieľom merania bolo zistenie veľkosti a počtu častíc, ktoré vzniknú pri spaľovaní biomasy a následné porovnanie koncentrácie jemných častíc bukového a smrekového dreva v rôznych fázach horenia.

Experimentálne meranie trvalo niekoľko hodín, pričom bolo do krbových kachlí pravidelne prikladané takmer rovnaké množstvo suchého naštiepaného dreva s hmotnosťou približne 2kg. Dĺžka prikladania, čiže perióda jedného cyklu horenia, trvala približne 1 hodinu. Počas merania bol vždy zaznamenaný čas prikladania, čo veľmi pomohlo pri spracovávaní dát vyexportovaných zo softvéru.

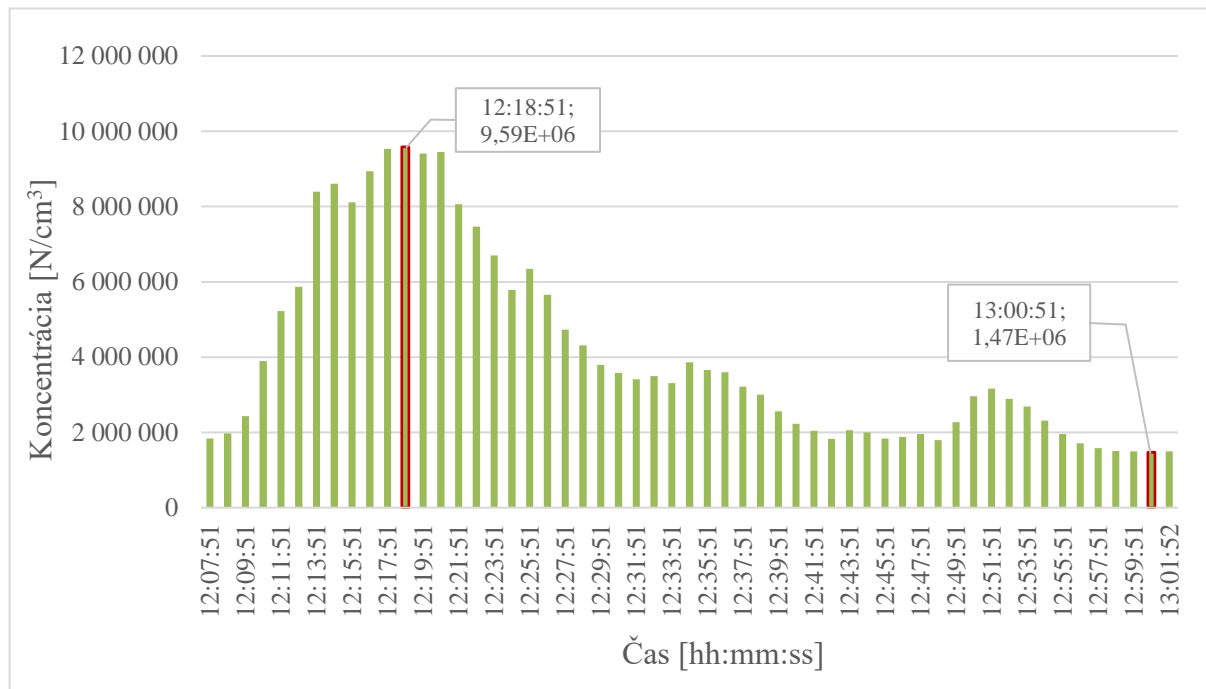
Cyklus horenia má niekoľko fáz, pričom počas každej fázy dochádza ku zmene koncentrácie častíc, viď graf 6.1.



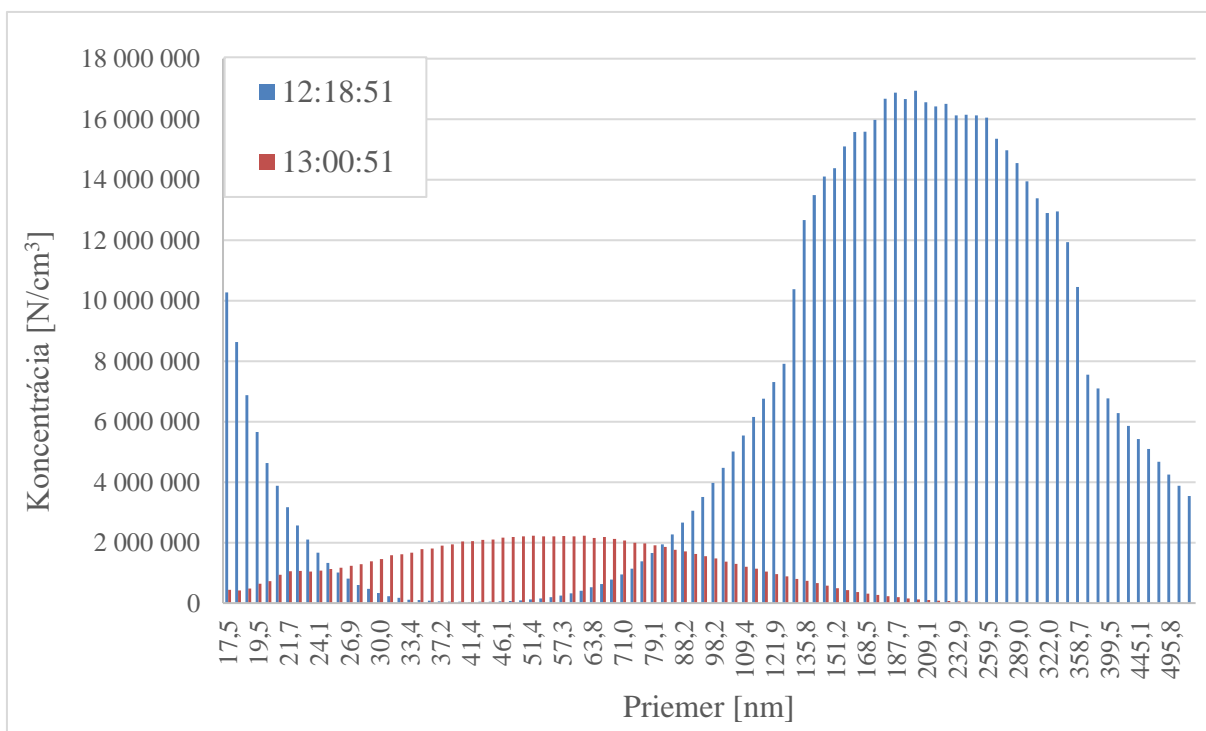
Graf 6.1 Zobrazenie celkovej koncentrácie jemných častíc v závislosti na čase

Trend nárastu a poklesu koncentrácie jemných častíc sa periodicky opakuje počas každého cyklu horenia dreva priloženého do krbových kachlí. Z tohto dôvodu boli na spracovanie dát ďalej vybrané vzorky koncentrácií v časovom horizonte približne jednej hodiny, t.j. doba medzi dvomi priloženiami do kachlí, viď graf 6.2.

Na grafe 6.2 je zvýraznená maximálna a minimálna koncentrácia jemných častíc zaznamenaných počas jednej periódy priloženia. Tento graf zobrazuje hodnotu celkovej koncentrácie jemných častíc, čiže súčet častíc všetkých veľkostí v závislosti na čase. Nevýhodou je, že neposkytuje presný údaj o veľkosti jednotlivých častíc, preto je vhodné si zvoliť konkrétne vzorky namerané počas 1 minúty a tie navzájom porovnávať, vid' graf 6.3



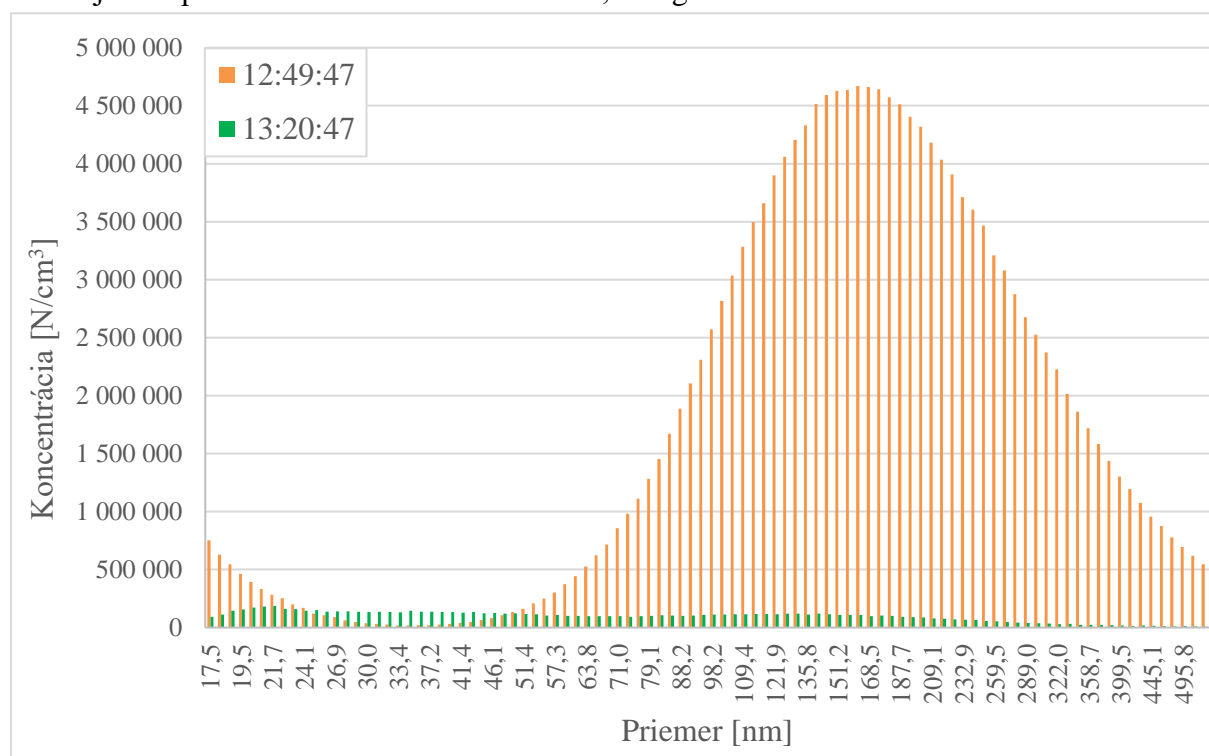
Graf 6.2 Maximum a minimum celkovej koncentrácie častíc počas jedného cyklu horenia bukového dreva



Graf 6.3 Porovnanie koncentrácií jemných častíc rôznych priemerov v prvej (modrá) a druhej (červená) fáze horenia smrekového dreva

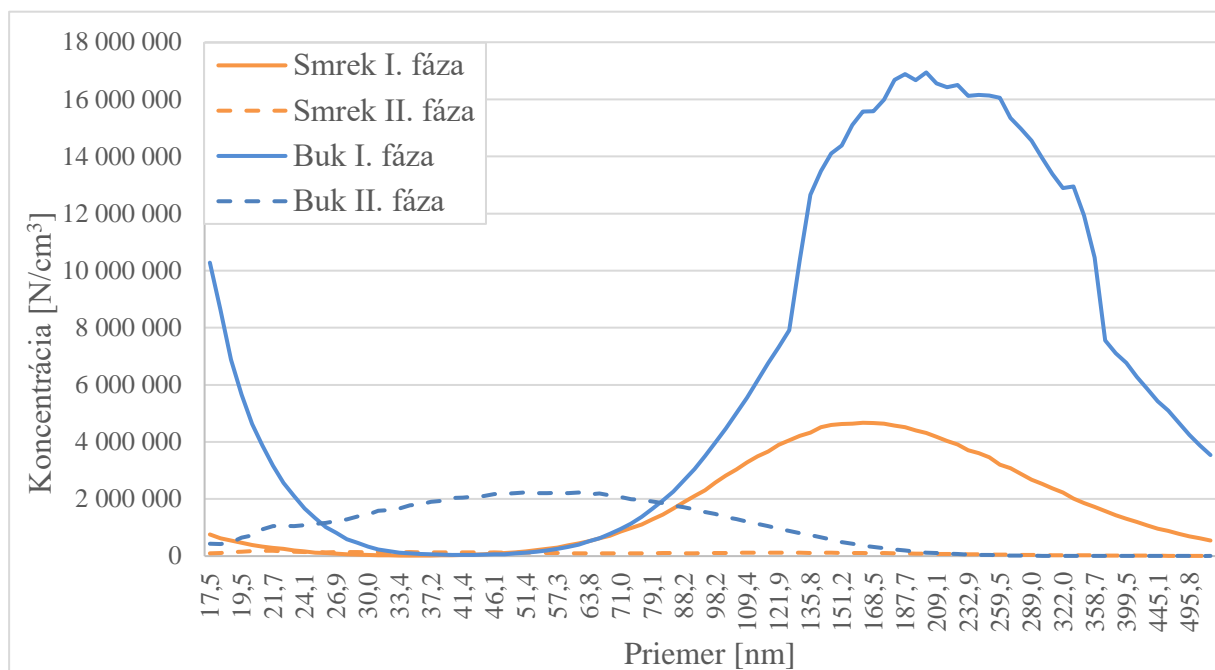
Graf 6.3 zobrazuje počet částic daného priemeru na centimeter kubický. Modrá časť grafu predstavuje koncentráciu častíc v prvej fáze horenia, presnejšie 10 minút po priložení bukového dreva do krbových kachlí. Práve táto vzorka je spomínané maximum počtu častíc, ktoré bolo vyznačené v predchádzajúcom grafe. Najvyššia koncentrácia častíc bola zaznamenaná vo veľkostnom rozmedzí približne 120 až 350 nanometrov. Červená oblasť grafu je vyznačené minimum tohto cyklu, ktoré nastalo v druhej fáze horenia. Z grafu je zrejmé, že v prvej fáze horenia, kedy dochádza ku spaľovaniu prchavej horľaviny, sa vylučujú častice určitých priemerov, a práve oblasť veľkosti od približne 40 do 50 nanometrov zobrazuje takmer nulovú koncentráciu. Naopak v druhej fáze horenia, kedy dohárajú tuhé zvyšky dreva, sa práve v tejto oblasti nachádza maximum koncentrácie vzniknutých častíc. Z tohto grafu je možné usúdiť, že počet častíc daného priemeru na centimeter kubický sa počas jedného cyklu horenia mení v čase. A teda produkcia polutantov z hľadiska veľkosti nie je počas procesu horenia konštantná.

Rovnakým spôsobom bolo vytvorené aj porovnanie koncentrácií jemných častíc vznikajúcich počas horenia smrekového dreva, viď graf 6.4.



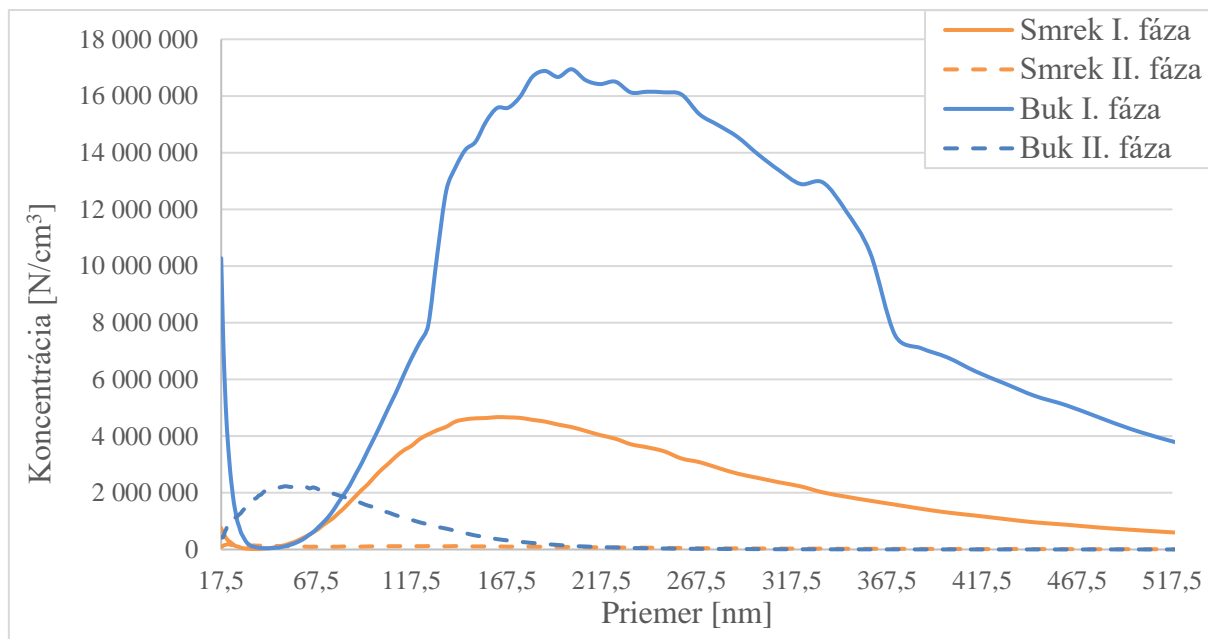
Graf 6.4 Porovnanie koncentrácií jemných častíc rôznych priemerov v prvej (oranžová) a druhej (zelená) fáze horenia smrekového dreva

Pre názornejšie porovnanie rozdielov v koncentráciách a priemeroch jemných častíc medzi spalinami vytvorenými horením bukového a smrekového dreva bol vytvorený graf 6.5, na ktorom je zjavne viditeľný rozdiel. Počas spaľovania bukového dreva sa vylučuje omnoho vyššie množstvo jemných častíc. Pre presnejšiu predstavu bol tento graf normalizovaný, viď graf 6.6. Normalizovať graf 6.5 je výhodné kvôli nelineárnemu popisu hodnôt priemerov častíc na osi x, čo mierne skresľuje obraz o reálnom stave.



Graf 6.5 Porovnanie koncentrácií jemných častíc vyprodukovaných spaľovaním bukového (modrá) a smrekového (oranžová) dreva

Graf 6.6 poskytuje presnejšiu predstavu o nameraných dátach. Koncentrácia jemných častíc bukového dreva počas prvej fázy spaľovania je približne 4x vyššia než u smrekového dreva. Zároveň je viditeľný posun maxima koncentrácie. U smrekového dreva sú najviac zastúpené častice s menším priemerom približne 150 nm, pričom u bukového dreva majú najväčšie zastúpenie častice o veľkosti približne 190 nm.



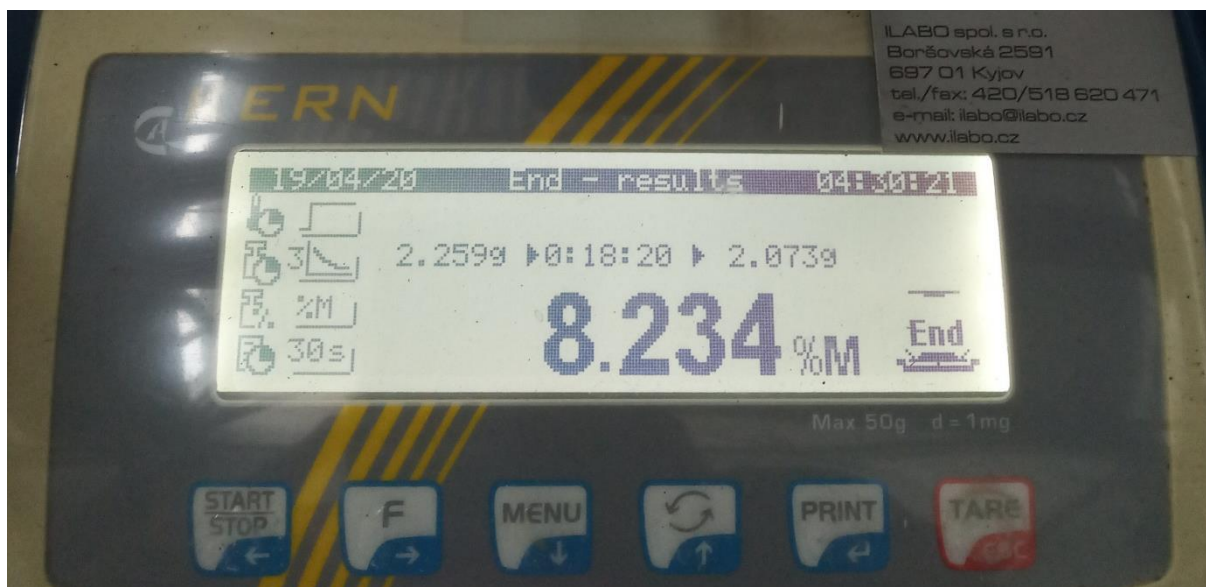
Graf 6.6 Normalizované porovnanie koncentrácií jemných častíc vyprodukovaných spaľovaním bukového (modrá) a smrekového (oranžová) dreva

### 6.3 Zhodnotenie výsledkov merania

Získané výsledky sú prekvapujúce, pretože na základe predošlých štúdií bol predpoklad, že smrekové drevo bude zdrojom vyššieho množstva polutantov než bukové drevo.

Vzhľadom na to, že spaľovanie smrekového a bukového dreva prebiehalo v rovnakých krbových kachliach, perióda prikladania dreva bola v oboch prípadoch dlhá rovnako približne 1 hodinu, hmotnosť priložených polien bola vždy približne 2kg, geometrický tvar naštiepaných polien bol takmer rovnaký, prívody vzduchu a ťah komína boli regulované na rovnakej hodnote, príčinou rozdielu v distribúcii koncentrácie jemných častíc je pravdepodobne rozdielne zloženie bukového a smrekového dreva a rôzne hodnoty vlhkosti dreva.

So zvyšujúcou sa vlhkosťou pevného paliva dochádza k nárastu produkcie tuhých znečisťujúcich látok. Nameraná vlhkosť bukového dreva bola 7,9%, smrekové drevo malo vlhkosť 8,2%, vid' obr. 6.10. Vyššia vlhkosť smrekového dreva opäť navádza k záveru, že práve toto drevo bude produkovať viac jemných častíc. Avšak, výsledky našich meraní sú opačné. Je možné, že práve vyššia vlhkosť smrekového dreva zapríčinila počas procesu spaľovania uvoľnenie väčšieho množstva vodnej pary. Zvýšený výskyt vodnej pary vytvára priaznivé prostredie pre zlučovanie jemných častíc, čo viedlo ku ich zväčšeniu nad škálu veľkostí, ktoré dokáže rozlíšiť použitá meracia aparatura.

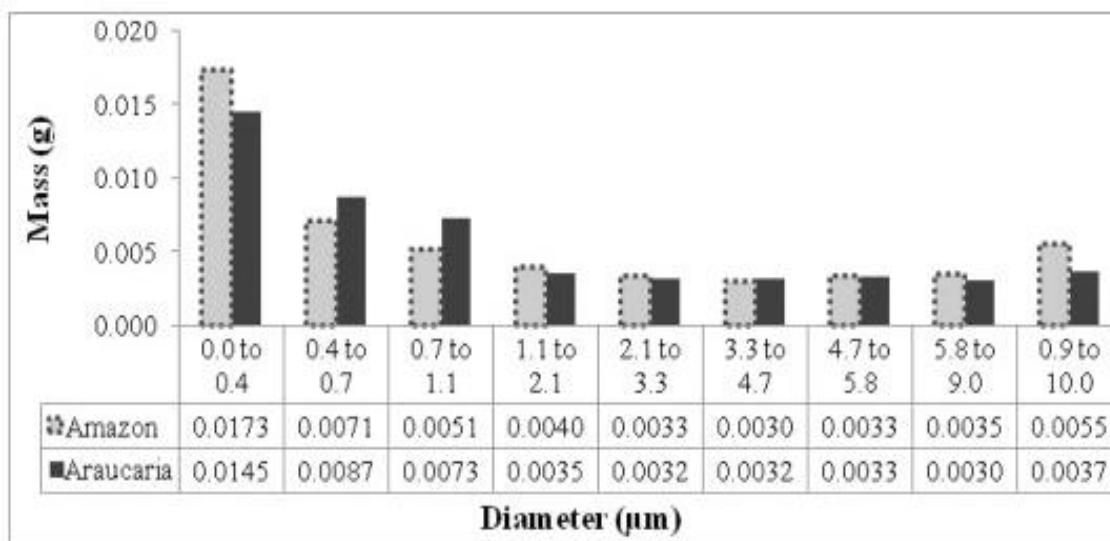


Obr. 6.10 Vlhkosť smrekového dreva nameraná na hodnotu 8,234%

Spomínanou možnou príčinou vyššej koncentrácie bukových polutantov je rozsah meraného spektra častíc. Rozmedzie nameraných priemerov bolo zvolené na 17,5 až 520 nanometrov. Pričom ak by sme merali množstvo častíc s veľkosťou v rádoch mikrometrov, výsledky by sa pravdepodobne líšili a smrekové drevo by sa prejavilo ako hlavný producent jemných častíc.

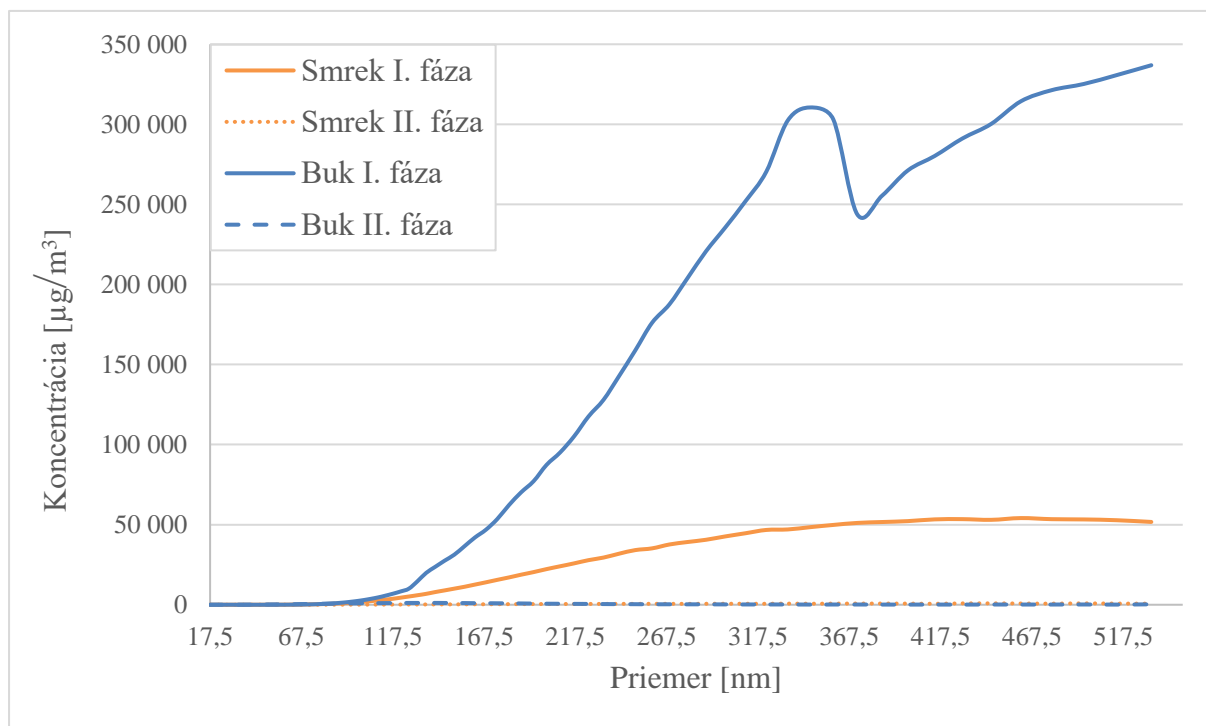
Túto hypotézu potvrdzuje aj štúdia brazílskych vedcov, ktorí skúmali spaľovanie mäkkého a tvrdého dreva. V našom prípade je reprezentant mäkkého dreva smrek a tvrdého dreva dub. V brazílskej štúdii bolo skúmané horenie amazonského dreva (tvrdé drevo) a araukária (mäkké drevo). Brazílski autori spaľovali v laboratórnych podmienkach vždy 2 kg dreva, preto považujem tento výskum za porovnateľný s našim. Ich zistením bolo, že do priemeru približne 0,4  $\mu\text{m}$  zaznamenali väčšie množstvo polutantov tvrdého dreva, nie mäkkého dreva, vid' obr. 6.11, čo koreluje s našimi nameranými hodnotami vyšších

koncentracií bukového dřeva v rozmezí velikosti do 400 nanometrov. Jemné částice větších rozmerov majú očekávané vlastnosti, a teda produkcia polutantov mäkkého dřeva u větších částic, je vyšší než u tvrdého dřeva [20].



Obr. 6.11 Hmotnostné zastúpenie jemných častíc vyprodukovaných spaľovaním amazonského (tvrdého) dřeva a araukárie (mäkké drevo) v závislosti na priemere častíc, Mass – Hmotnosť, Diameter – Priemer. [20]

Vzhľadom na to, že doteraz boli všetky dáta vyhodnocované v koncentrácii, ktorá uvádzala počet častíc na centimeter kubický a brazílsky výskum bol udávaný v mikrogramoch na meter kubický, bol zhotovený graf 6.7, ktorý porovnáva naše vyššie uvedené skúmané vzorky v grafe graf 6.6, avšak na osi ypsilon uvádza hmotnostnú koncentraciu. Toto zobrazenie je vhodné na porovnanie výsledkov s meraním brazílskych autorov.



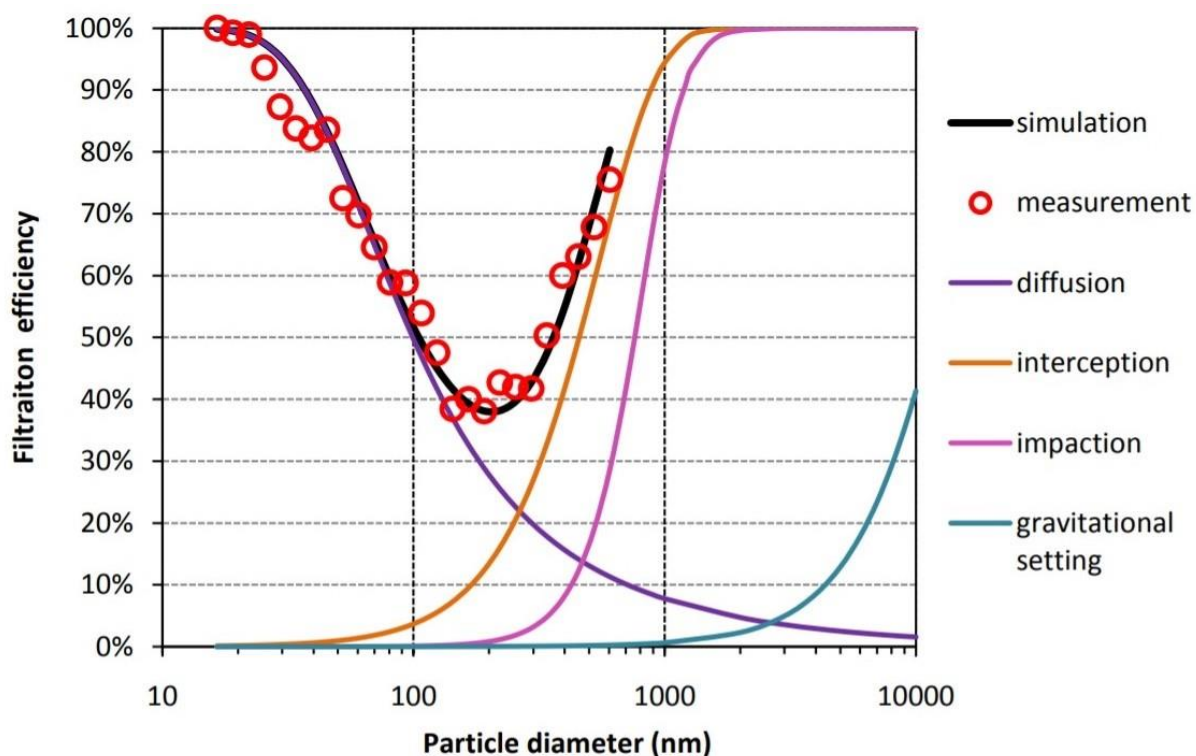
Graf 6.7 Normalizované porovnanie hmotnostných koncentracií jemných častíc vyprodukovaných spaľovaním bukového (modrá) a smrekového (oranžová) dřeva



## 7 ELIMINÁCIA JEMNÝCH ČASTÍC

Okrem vhodného nastavenia spaľovacieho zariadenia, voľby paliva atď. môžeme ovplyvniť a výrazne znížiť množstvo vyprodukovaných tuhých znečisťujúcich látok filtráciou.

Filtrácia je proces, ku ktorému dochádza viacerými mechanizmami v závislosti od veľkosti filtrovaných častíc. V prípade väčších častíc, ktoré majú vyššiu hmotnosť, dochádza ku kolízii častice s prekážkou (napr. vláknom filtra). Častica počas prechodu medzi vláknami filtra nie je schopná zmeniť svoj smer a v dôsledku svojej zotrvačnosti do vlákna narazí. Pri náraze predá svoju kinetickú energiu prekážke, kedy dochádza ku tzv. zachyteniu nárazom. V prípade, že sa častica unášaná vzduchom pohybuje v priečnom smere vzhľadom na vlákna filtra, dochádza ku zachyteniu dotykom. Častice menších rozmerov majú v dôsledku prevládania neusporiadaného Brownovho pohybu tendenciu difundovať, a teda dochádza k tzv. difúznemu zachytu. Ďalšie spôsoby sú napr. gravitačný záchyt, ktorý sa využíva u častíc s veľkou hmotnosťou. Elektrostatický záchyt sa využíva u častíc s nábojom. Príspevky jednotlivých mechanizmov vo filtri F7 sú znázornené na obr. 7.1. Účinnosť ľubovoľnej filtrácie ovplyvňuje priemer vlákien, hustota výplne, hrúbka filtra, priemer častice a jej čelná rýchlosť [21].



Obr. 7.1 Vypočítaná a nameraná účinnosť filtra typu F7 zo sklených vlákien. Jednotlivé krivky zobrazujú príspevky spomínaných mechanizmov zachytu častíc.

Filtration efficiency – účinnosť filtrácie, particle diameter – priemer častice,  
simulation – matematická simulácia, measurement – výsledok merania, diffusion – difúzny záchyt,  
interception – zachytenie dotykom, impaction – zachytenie nárazom,  
gravitational setting – gravitačný záchyt [23]

Dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje voľbu filtračného zariadenia je vzduch, ktorý chceme vyčistiť, preto sa rozlišuje priemyselná filtrácia a atmosférická filtrácia. Pričom vstupná koncentrácia jemných častíc pri filtrácii atmosférického vzduchu je zvyčajne o niekoľko rádov nižšia než v prípade priemyselnej filtrácie [6].

V uzavretých priestoroch, akými sú napr. výrobné haly, je možné riadiť smer toku tuhých znečisťujúcich látok medzi oblasťami budovy na základe nastavenia vhodných tlakových podmienok, ktoré ovplyvňujú prúdenie vzduchu. Požadované prúdenie sa dá dosiahnuť nastavením pretlaku a podtlaku. Dôležité ovplyvňujúce faktory sú aj teplota a vlhkosť vzduchu, s ktorým sa častice pohybujú. Odpadový vzduch by sa mal odvádzať von, aby sa eliminovali zdravotné riziká pracovníkov, obyvateľov budovy a negatívne dopady na životné prostredie [22].

Pri použití filtrov typu F7 a vyšších je potrebné venovať osobitú pozornosť vplyvu tlaku v okolitom prostredí, pretože podmienky prúdenia vzduchu ovplyvňujú spotrebu elektrickej energie filtračného zariadenia. Príliš veľké tlakové straty sú neekonomické. Indikátorom potreby výmeny filtra je zväčša pokles tlaku, ktorý je spôsobený upchatím filtra [22].

## 7.1 Rozdelenie vlákňitých filtrov

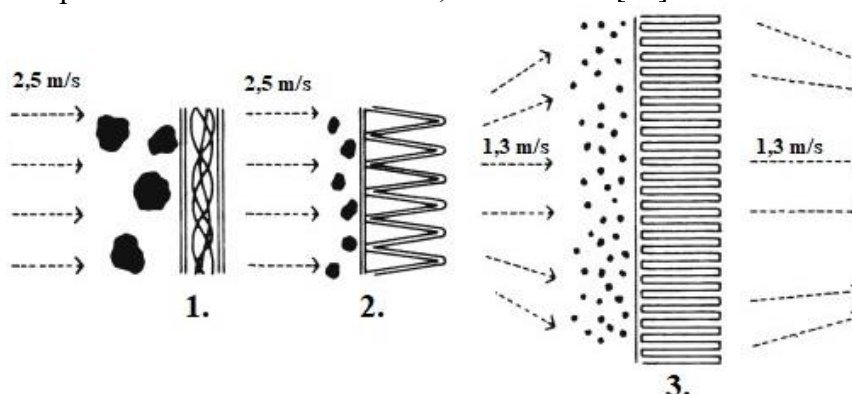
Existuje niekoľko druhov vlákňitých filtrov, pričom voľba filtračného zariadenia závisí od miery znečistenia média, ktoré chceme vyčistiť, vid' tab. 7.1. Z uvedenej tabuľky sú na čistenie ovzdušia od PM častíc vyhovujúce vlákňové filtre typu F - Fine Filter, E - Efficient Particulate Air Filter (EPA), H - High-efficient Particulate Air Filter (HEPA) a U - Ultra-Low Penetration Air Filter (ULPA) [23].

Skupina filtrov	Trieda filtrácie	Odlúčené látky	Veľkosť odlúčených častíc
Hrubý prach	G1, G2	hmyz, piesok, vodné kvapky	$\geq 10 \mu\text{m}$
	G3, G4	peľ, hmla	
Jemný prach	M5	výtrusy, cementový prach	$\geq 1 \mu\text{m}$
	M6	väčšie baktérie, $\text{PM}_{10}$	
	F7, F8	sadze, $\text{PM}_{2,5}$	
	F8, F9	tabakový dym, baktérie	
Mikročastice	E12, H13	aerosól, olejový dym	$\geq 0,1 \mu\text{m}$
	H14	vírusy	
	U15, U16, U17	mikročastice aerosólu	

Tab. 7.1 Základné rozdelenie vlákňitých filtrov [24]



Vzhľadom na to, že zdroje jemných častíc produkujú polydisperzné aerosóly, je výhodné využívať viacstupňové filtre, ktoré dokážu zachytiť častice širokého spektra veľkostí, pokiaľ sa dodrží správne radenie filtrov za seba, viď obr. 7.2 [25].



Obr. 7.2 Viacstupňový filter,

1 – zachytenie nárazom a dotykom vo filtri na hrubý prach, 2 – difúzny záchyt jemného prachu vo filtri s rozšíreným povrchom, 3 - difúzny záchyt mikročastíc v HEPA filtri [25]

Jednou z nevýhod mechanických vzduchových filtrov je zanášanie filtra, ktorý následne môže pôsobiť ako zdroj znečistenia, najmä v prípade, že je čistý vonkajší vzduch nasávaný cez takýto filter. Rozmery použitých vlákien sa pohybujú v jednotkách mikrometrov, preto sa tieto filtre nejavia ako vhodné na zachytávanie ultra jemných častíc frakcie  $PM_{2,5}$  a menších. Toto zistenie viedlo ku vytvoreniu nanovláknien, ktorých hrúbka sa pohybuje okolo 100 nm, čo výrazne zvýšilo účinnosť filtrácie [26].

Ako bolo uvedené v tab. 7.1, najvhodnejšou voľbou filtrov na zachytenie ultra jemných častíc sú tzv. HEPA a ULPA filtre, ktoré využívajú filtračné médium s vysokou hustotou, vyrobené zo syntetických vlákien. Tesné usporiadani vlákien zapríčiňuje zníženie rýchlosti vzduchu, ktorý takýmto filtrom prechádza. Kým pri filtroch na jemný prach sa dosahuje rýchlosť približne 0,12 m/s, u filtrov na mikročastice spomínaná rýchlosť klesá na 0,03 m/s [25].

Riešením tohto prietokového obmedzenia je napr. použitie elektrostatických odľučovačov, ktoré sú schopné zachytávať ultrajemné častice a dokážu pracovať s vyššími rýchlosťami vzduchu, v závislosti od úrovne a hustoty prachu.

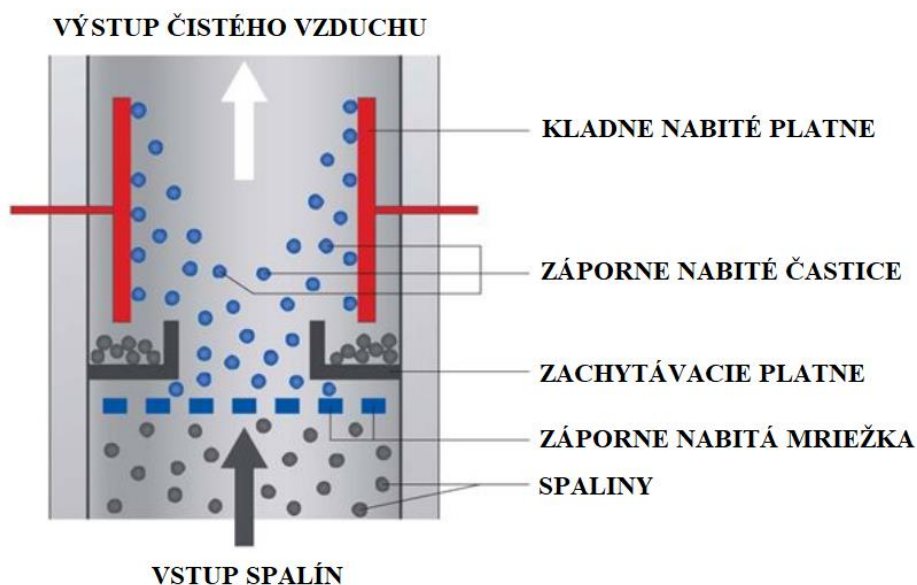
## 7.2 Elektrostatické odľučovače

Vzhľadom na to, že v experimentálnej časti bola meraná koncentrácia jemných častíc, ktoré vznikli spaľovaním dreva v krbových kachliach, nasledujúca časť je venovaná elektrostatickému čisteniu ovzdušia, ktoré je možné inštalovať do komínov spaľovacích jednotiek.

Elektrostatický odľučovač jemných častíc je možné inštalovať na výstupe komína alebo priamo v dolnej časti pri spaľovacej jednotke dreva. V prípade umiestnenia na výstupe komína sa komplikuje prístup ku odľučovaču a vzhľadom na to, že je toto zariadenie umiestnené vonku, je potrebná aj dodatočná ochrana pred zrážkami, vetrom atď. Pri použití elektrostatického odľučovača častíc v ústiacej časti do komína je riziko, že pri otváraní a čistení sa môže kontaminovaný vzduch dostať do vnútornej miestnosti [27].

Základným princípom funkcie elektrostatického odľučovača častíc, viď obr. 7.3, je prechod častíc cez elektrické pole. Elektrické pole vysokého napätia, ktoré sa vytvára v okolí

vnútornej elektródy ionizuje spaliny. Kladne nabité ióny sú zachytené záporne nabitou elektródou. Záporne nabité ióny, označované ako korónový výboj, putujú ďalej komínom smerom k jeho vyústeniu do vonkajšieho priestoru. Počas cesty komínom sú tieto záporne nabité častice odklonené a zhromaždené na uzemnených platniach. Následne vplyvom vlastnej tiaže častice padnú na zachytávacie platne, ktoré sa v pravidelných intervaloch čistia. Faktory, ktoré ovplyvňujú účinnosť elektrostatického filtra sú najmä hodnota elektrického napätia, prietok spalín a dĺžka komína [27].



Obr. 7.3 Schéma elektrostatického odlučovača v komíne [35]

## **8 ZÁVER**

Napriek mnohým výskumom stále nebol špecifikovaný presný druh jemných častíc, ktorý by sme mohli označiť za najnebezpečnejší pre ľudské zdravie. Mnohé štúdie poukazujú na rôzne výsledky. Na jednej strane hodnotia veľkosť častíc, pri čom tie väčšie nie sú schopné sa dostať tak hlboko do organizmu ako ultrajemné častice. Na druhej strane rozlišujú mieru ich toxicity na základe chemického zloženia a chemických vlastností, ktoré sa môžu navzájom líšiť. Za najviac smerodajný faktor považujem povrch samotnej častice a jej zloženie, pretože častica s veľkým povrchom je schopná na seba z okolitého prostredia naviazať významné množstvo nebezpečných polutantov a karcinogénnych látok ako napr. olovo, kadmium, chróm, arzén, mangán a iné.

Meranie koncentrácií sprevádzané skúmaním optimálneho nastavenia spaľovacích jednotiek sa javí ako kľúčové pri hľadaní riešení eliminácie produkcie týchto znečisťujúcich látok. V experimentálnej časti tejto práce bola na zistenie koncentrácie jemných častíc vo veľkosti od 17,5 do 520 nanometrov použitá metóda SMPS a namerané hodnoty boli vyhodnotené prostredníctvom programu Aerosol Instrument Manager Software. Po porovnaní spaľovania smrekového a bukového dreva poskytli namerané dáta prekvapujúci výsledok. Hoci bol predpoklad, že smrekové drevo vyprodukuje počas procesu horenia väčšie množstvo častíc, ukázalo sa, že v meranej veľkostnej škále bola koncentrácia tuhých jemných častíc vyprodukovaných smrekovým drevom až takmer 4x nižšia než v prípade bukového dreva. Tento výsledok považujem za inšpiráciu pre skúmanie tejto problematiky v budúcnosti. Meranie by bolo pravdepodobne potrebné opakovať viackrát, aby sa potvrdili získané výsledky. Je možné, že ak by sme merali množstvo častíc s veľkosťou v rádoch mikrometrov, výsledky by sa pravdepodobne líšili a smrekové drevo by sa prejavilo ako hlavný producent jemných častíc. Túto úvahu potvrdzuje aj štúdia brazílskych vedcov, ktorá je pre porovnanie uvedená v závere experimentálnej časti práce.

Ľudská činnosť je príčinou vzniku obrovského množstva nežiadúcich polutantov. Avšak technologický progres nie je iba zdrojom ekologických problémov, ale aj ich riešením. Posledná kapitola práce je z tohto dôvodu venovaná stručnému opisu čistenia ovzdušia od jemných častíc prostredníctvom filtrov a elektrostatických odlučovačov, ktoré sú využívané na čistenie spalín v domácich vykurovacích jednotkách.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2011. Stavíme. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [2] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [3] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]. In: . Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>
- [4] IBLER, Zdeněk. *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.
- [5] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Vyd. 1. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [6] NOVÝ, Richard. *Technika prostředí*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-03492-5.
- [7] RICHTER, Miroslav. *Technologie ochrany životního prostředí*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. ISBN 80-7044-585-8.
- [8] BUZEA, Cristina, Ivan. BLANDINO a Kevin ROBBIE. *Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity* [online]. In: . 2007. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3280.pdf>
- [9] FRIČ, Martin, Marián SCHWARZ, Miroslav DADO a Lucia BUSTIN. *Analýza nanočástic a mikročástic v pracovnom ovzduší pri spracovaní kovového materiálu* [online]. 2017. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e876/c8667d670c9cc58078b79eecf199e301c358.pdf>
- [10] *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution* [online]. 2007. Dostupné z: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/78657/E88189.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf)
- [11] *Fine and Ultrafine Particles in the Vicinity of Industrial Activities: A Review* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2015.1025636>
- [12] *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project* [online]. Dostupné z: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1)
- [13] *Years of life lost (YLL) per 100 000 inhabitants attributable to exposure to PM2.5 in European countries (2016)* [online]. In: . Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/years-of-life-lost-per-1>
- [14] KLEEMAN, Michael, James SCHAUER a Glen CASS. *Size and Composition Distribution of Fine Particulate Matter Emitted from Wood Burning, Meat Charbroiling, and Cigarettes* [online]. In: . Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es981277q>
- [15] *Krbová kamna: Všeobecný návod k obsluze, montáži a údržbě* [online]. In: . Dostupné z: [https://www.abx-kamna.cz/produkty/treti/n153\\_krbovakamnavseobecnynavodkobsluzemontaziaudrzbec2.pdf](https://www.abx-kamna.cz/produkty/treti/n153_krbovakamnavseobecnynavodkobsluzemontaziaudrzbec2.pdf)
- [16] *Operation and service manual: Rotating disk thermophilizer model 379020a, Thermal conditioner air supply model 379030* [online]. In: . 2012. Dostupné z: [https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2016/06/TSI\\_379020A\\_Rotating\\_Disk\\_Thermophilizer\\_Manual.pdf](https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2016/06/TSI_379020A_Rotating_Disk_Thermophilizer_Manual.pdf)

- [17] Dekati® Diluter [online]. In: . 2015. Dostupné z: [https://www.dekati.com/wp-content/uploads/dekati\\_diluter\\_brochure122018.pdf](https://www.dekati.com/wp-content/uploads/dekati_diluter_brochure122018.pdf)
- [18] TSI. *Series 3080 Electrostatic Classifiers: Operation and Service Manual* [online]. In: . Dostupné z: [http://cires1.colorado.edu/jimenez-group/Manuals/SMPS\\_3080\\_manual.pdf](http://cires1.colorado.edu/jimenez-group/Manuals/SMPS_3080_manual.pdf)
- [19] TSI. *Model 3775 Condensation Particle Counter: Operation and Service Manual* [online]. In: . Dostupné z: <http://www.lisa.u-pec.fr/~formenti/Tools/Manuals/CPC-3775r-manual.pdf>
- [20] AMARAL, Simone, João DE CARVALHO, Maria COSTA, Turíbio NETO, Rafael DELLANI a Luiz LEITE. *Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: Chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions* [online]. In: . Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414005653#f0025>
- [21] SKÁCEL, František a Viktor TEKÁČ. *Analýza ovzduší*. Vydání: první. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.
- [22] *Ventilation for non-residential buildings — Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems* [online]. In: . Dostupné z: [http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI\\_25\\_Pre-FV\\_version\\_prEN\\_13779\\_Ventilation\\_for\\_non-residential\\_buildings.pdf](http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI_25_Pre-FV_version_prEN_13779_Ventilation_for_non-residential_buildings.pdf)
- [23] SHI, Bingnibg. *Removal of ultrafine particles by intermediate air filters in ventilation systems: Evaluation of performance and analysis of applications* [online]. 2012. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/165538/165538.pdf>
- [24] TROX KS FILTER A.S. *Rozdělení filtrů do tříd, vlastnosti filtrů a typické příklady použití* [online]. Dostupné z: <https://www.ksklimaservice.cz/cz/rozdeleni-filtru-do-trid-vlastnosti-filtru-a-typicke-priklady-pouziti>
- [25] SPARKS, Trevor a George CHASE. *Filters and Filtration Handbook* [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080993966000034>
- [26] ZUO, Fenglei, Shichao ZANG, Hui LIU, Hao FONG, Xia YIN, Jianyong YU a Bin DING. *Free-Standing Polyurethane Nanofiber/Nets Air Filters for Effective PM Capture* [online]. In: . Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sml.201702139>
- [27] DASTOORI, KOLHE, MALLARD a MAKIN. *Electrostatic precipitation in a small scale wood combustion furnace* [online]. 2011. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388611001112#bib3>
- [28] *Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: A review* [online]. 2009. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209000991>
- [29] *Fotosyntéza schéma* [online]. In: . Dostupné z: <https://pixabay.com/cs/illustrations/fotosyntéza-schéma-fotosyntézy-3498260/>
- [30] *Soot particle size distribution functions in a turbulent non-premixed ethylene-nitrogen flame* [online]. In: . Dostupné z: <https://ccrc.kaust.edu.sa/Pages/Pub-2017-SPS.aspx>
- [31] TSI. *Product information: Model 3080-Series Electrostatic Classifiers* [online]. In: . Dostupné z: <https://envcoglobal.com/files/docs/model-3080-spec-sheet.pdf>
- [32] *How do ultrafine welding fume particles get into the body and what effects do they have?* [online]. In: . Dostupné z: <https://safe-welding.com/how-do-ultrafine-welding-fume-particles-get-into-the-body-and-what-effects-do-they-have/>
- [33] *Technický list výrobku: Krbová kamna Grönland 4673-6* [online]. In: . Dostupné z: [https://www.abx-kamna.cz/produkty/dalsi/b153\\_gronland46736cs.pdf](https://www.abx-kamna.cz/produkty/dalsi/b153_gronland46736cs.pdf)

- [34] *Future Diesel Emission Limits* [online]. In: . 2008. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/ellis/future-diesel-emission-limits>
- [35] *Charging by contact* [online]. In: . Dostupné také z: <https://slideplayer.com/slide/5270466/>